

Н. Д. Торопцев

**АСИНХРОННЫЕ
ГЕНЕРАТОРЫ
ДЛЯ АВТОНОМНЫХ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК**

**ПРИЛОЖЕНИЕ К ЖУРНАЛУ
ЭНЕРГЕТИК**

Библиотечка электротехника

— приложение к журналу “Энергетик”

Основана в июне 1998 г.

Выпуск 7(67)

Н. Д. Торопцев

АСИНХРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Москва

НТФ “Энергопрогресс”, “Энергетик”

2004

Главный редактор журнала “Энергетик” А. Ф. ДЬЯКОВ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

“Библиотечки электротехника”

В. А. Семенов (*председатель*), И. И. Батюк (*зам. председателя*),
Б. А. Алексеев, К. М. Антипов, Г. А. Безчастнов, А. Н. Жулев,
В. А. Забегалов, В. Х. Ишкин, Ф. Л. Коган, В. И. Кочкарев,
Н. В. Лисицын, Л. Г. Мамиконянц, Л. Ф. Плетнев, В. И. Пуляев,
Ю. В. Усачев, М. А. Шабад

Торопцев Н. Д.

Т 59 Асинхронные генераторы для автономных электроэнергетических установок. М.: НТФ “Энергопрогресс”, 2004. — 88 с.; ил. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу “Энергетик”. Вып. 7(67)].

Дана классификация автономных электроэнергетических установок с асинхронными генераторами.

Описаны особенности и свойства асинхронных генераторов с конденсаторным и вентильным возбуждением. Рассмотрены уравнения асинхронного самовозбуждающегося генератора, схемы замещения и векторные диаграммы, соотношения для частоты генерируемых колебаний, характеристики, способы стабилизации напряжения.

Предложен простой графоаналитический метод определения энергетических показателей генераторных установок. Приведены примеры расчета.

Для электротехников и электромехаников.

Предисловие

В связи с освоением производства высокоэффективных пленочных конденсаторов и созданием управляемых полупроводниковых приборов существенно расширились возможности применения автономных электроэнергетических установок, электрическими машинами которых являются асинхронные генераторы.

В брошюре рассматривается широкий круг вопросов по особенностям и свойствам:

асинхронных самовозбуждающихся генераторов трехфазного тока;
асинхронных самовозбуждающихся вентильных генераторов (АГВ) постоянного тока;

асинхронных генераторов с вентильным возбуждением (АГВВ) постоянного тока и трехфазного тока стабильной частоты.

Основное внимание уделено асинхронным самовозбуждающимся генераторам с короткозамкнутым ротором как наиболее простым и отличающимся высокой эксплуатационной надежностью.

Описаны области применения асинхронных генераторов — самовозбуждающихся и с независимым возбуждением. К одной из них относится освещение и обогрев помещений на лесосеках, лесосплаве, изыскательских и других работах с помощью передвижной электростанции “Дружба”. Аналогичные электроэнергетические установки с асинхронными генераторами повышенной частоты (200 Гц) особенно перспективны для применения в районах стихийных бедствий.

**Пожелания и замечания просьба направлять по адресу:
115280, Москва, ул. Автозаводская, 14/23.
Редакция журнала “Энергетик”.**

Автор

1. Элементы автономных электроэнергетических установок с асинхронными генераторами

Автономные электроэнергетические установки с асинхронными генераторами состоят из трех элементов — приводного двигателя, асинхронной машины и источника реактивной мощности. Примером исключения служит аналогичная установка для преобразования трехфазного тока в постоянный, содержащая четвертый элемент — выпрямительный мост А. Н. Ларионова.

В качестве приводных двигателей возможно использование как природных источников энергии (силы ветра, напора воды и др.), так и двигателей внутреннего сгорания.

Асинхронные генераторы в зависимости от конкретных условий применения выполняются с короткозамкнутым, фазным или полым ротором. К источникам необходимой для них реактивной мощности относятся статические конденсаторы или вентильные преобразователи с искусственной коммутацией вентилей.

Основным элементом рассматриваемых электроэнергетических установок является асинхронный генератор.

2. Классификация асинхронных генераторов. Энергетические соотношения

Асинхронные генераторы можно классифицировать по:
способу возбуждения;
характеру выходной частоты (изменяющаяся, постоянная);
способу стабилизации напряжения;
рабочим областям скольжения;
конструктивному выполнению;
числу фаз.

Как видно, последние два признака характеризуют конструктивные особенности генераторов. Характер выходной частоты и методы стабилизации напряжения в значительной степени обусловлены способом образования магнитного потока машины. Классификация асинхронных генераторов по *способу возбуждения* является основной. Таким образом, условимся различать генераторы с *самовозбуждением* и с *независимым возбуждением*.

Асинхронные генераторы первого класса возбуждаются:

- а) с помощью конденсаторов, включенных в цепь статора или ротора или одновременно в первичную и вторичную цепи;
- б) посредством вентильных преобразователей с естественной и искусственной коммутацией вентилей.

Асинхронные генераторы второго класса возбуждаются от внешнего источника переменного напряжения.

По *характеру частоты* самовозбуждающиеся генераторы разделяются на две группы. К первой из них относятся источники практически постоянной (или постоянной) частоты, ко второй — переменной (регулируемой) частоты. Последние применяются для питания асинхронных двигателей с плавным изменением частоты вращения [4]. Частота генераторов первой группы в пределах нормальных нагрузок при постоянной частоте вращения ротора изменяется незна-

чительно и может быть стабилизирована (например, с помощью балластных сопротивлений).

Рабочими областями асинхронных генераторов являются области отрицательных и положительных скольжений, определяемых по соотношению

$$s = \frac{n - n_2}{n}, \quad (1)$$

где n — частота вращения магнитного поля, или синхронная частота вращения; n_2 — частота вращения ротора, причем

$$n = \frac{60 f_1}{p}, \quad (2)$$

где f_1 — частота генерируемого напряжения; p — число пар полюсов машины.

Если электромагнитная мощность генератора является только мощностью скольжения, то питание нагрузки возможно лишь при отрицательных скольжениях. В области отрицательных скольжений работают самовозбуждающиеся генераторы и короткозамкнутые генераторы независимого возбуждения с трехфазной статорной обмоткой.

Для короткозамкнутого генератора нормального исполнения характерно, что его статорная обмотка выполняет функции входной (возбуждения) и выходной (генераторной) обмоток. При раздельном выполнении входной и выходной обмоток электромагнитная мощность первой остается мощностью скольжения — направление ее передачи зависит от знака скольжения, в то время как направление передачи электромагнитной мощности второй обмотки от скольжения не зависит.

К асинхронным генераторам независимого возбуждения, работающим в области положительных скольжений, относятся асинхронные тахогенераторы и асинхронные преобразователи частоты.

В ряде случаев на напряжение возбуждения включается обмотка ротора. Генераторы, возбуждаемые со стороны ротора, используются при параллельной работе с сетью [11] и при работе на автономную сеть [8, 13].

Если возбуждать ротор трехфазным током прямого или обратного следования фаз, частота которого пропорциональна скольжению, то при изменении частоты вращения ротора частота вращения поля и,

соответственно, частота напряжения на выходе будут оставаться постоянными. Частота вращения поля может быть выбрана промежуточной между предельными значениями частоты вращения ротора. Тогда при $s = 0$ генератор должен возбуждаться постоянным током. Это послужило поводом к введению термина “асинхронизированная синхронная машина”.

Практическое использование генератора в трех областях скольжений связано с решением ряда проблем. Более простая система генерирования переменного тока стабильной частоты получается при работе генератора в одной области положительных скольжений.

Среди асинхронных генераторов независимого возбуждения особое место занимает короткозамкнутый генератор, работающий в режиме асинхронного усилителя мощности переменного тока. Основными элементами генераторной установки являются асинхронный (АГ) и задающий (ЗГ) генераторы. Назначение ЗГ состоит в генерировании колебаний определенной частоты, а АГ — в усилении этих колебаний [5]. В зависимости от типа ЗГ возможно получение переменного тока прецизионной частоты, необходимого для некоторых новых областей техники.

Рассмотрим операцию перевода асинхронной короткозамкнутой машины в режим генератора независимого возбуждения. Для этого достаточно асинхронный двигатель, включенный на напряжение сети, развернуть с помощью постороннего двигателя в направлении вращения магнитного поля до сверхсинхронной частоты вращения (рис. 1). Положим, что значения скольжения машины в двигательном и генераторном режимах равны, что отмечено звездочками на шкале скольжений (рис. 2). Тогда векторная диаграмма токов и напряжений примет вид, показанный на рис. 3. Из анализа диаграммы следуют важные выводы:

1) асинхронный генератор является источником активной мощности, так как по сравнению с двигательным режимом у него изменяется направление только активной составляющей тока;

2) асинхронный генератор, так же как и двигатель, является потребителем реактивной мощности, необходимой для создания магнитного поля.

Структурные схемы автономных электроэнергетических установок с асинхронными генераторами при различных способах возбуждения приведены ниже. Направления активной мощности показаны сплошными стрелками, реактивной — пунктирными.

При рассмотрении энергетических соотношений потерями в генераторах условимся пренебрегать.

Уравнения баланса мощностей для автономной системы электроснабжения с асинхронным самовозбуждающимся генератором при

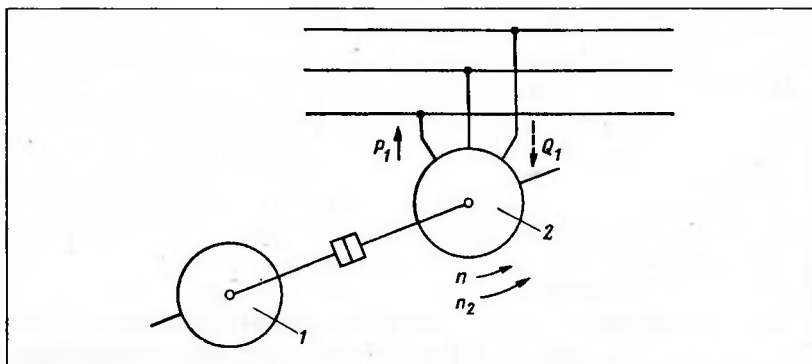


Рис. 1. Перевод асинхронного двигателя в генераторный режим работы:

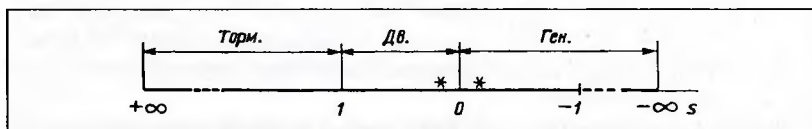


Рис. 2. Шкала скольжений асинхронной машины

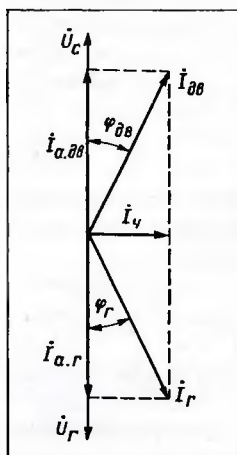


Рис. 3. Векторные диаграммы асинхронной машины в двигательном и генераторном режимах

включении конденсаторов в цепь обмотки статора (рис. 4) представим в виде:

$$\left. \begin{aligned} m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 &= m_1 U_1 I \cos \varphi; \\ m_1 \left(\frac{I_K^2}{\omega_1 C} - I^2 \omega_1 L \right) &= Q_{AG}; \\ m_1 \frac{I_K^2}{\omega_1 C} &= Q_{AG}; \\ m_1 \frac{I_K^2}{\omega_1 C} + m_1 I^2 \left(\frac{1}{\omega_1 C_K} - \omega_1 L \right) &= Q_{AG}; \\ \frac{m_1}{\omega_1} \left(\frac{I_K^2}{C} + \frac{I^2}{C_K} \right) &= Q_{AG}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где I_1, I, I_K — токи фазы генератора, нагрузки и шунтирующих конденсаторов; ω_1 — угловая

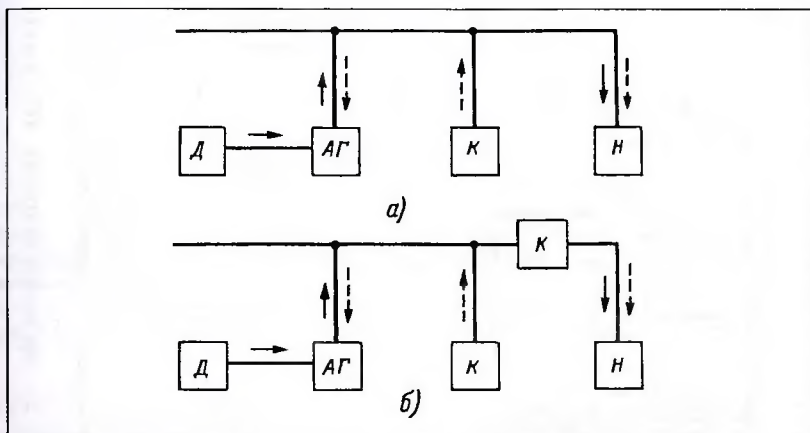


Рис. 4. Структурные схемы электроэнергетических установок с асинхронными самовозбуждающимися генераторами при включении:

а — шунтирующих конденсаторов; б — компаундирующих конденсаторов

частота напряжения генератора; L — индуктивность фазы нагрузки; C , C_K — емкость фазы шунтирующих и компаундирующих конденсаторов; φ_1 , φ — фазовые углы сдвига генератора и нагрузки; $m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1$ — электромагнитная мощность генератора; Q_{AG} — реактивная мощность генератора, определяемая через параметры и токи схемы замещения:

$$Q_{AG} = m\omega_1 (I_1^2 L_{\sigma 1} + I_2'^2 L_{\sigma 2}' + I_0^2 L_m),$$

где $L_{\sigma 1}$, $L_{\sigma 2}'$ — индуктивности рассеяния фазы статора и приведенного ротора; L_m — индуктивность намагничивающего контура; I_0 — ток холостого хода.

Первое уравнение системы (3) является уравнением баланса активных мощностей. Оно остается справедливым для любой автономной системы с асинхронным самовозбуждающимся генератором. Остальными уравнениями выражается баланс реактивных мощностей при активно-индуктивной или активной нагрузке и при использовании в генераторной установке только шунтирующих конденсаторов или шунтирующих и компаундирующих конденсаторов.

Одна из возможностей создания регулируемого привода с асинхронными двигателями основывается на использовании асинхронных самовозбуждающихся генераторов переменной частоты. Конструктивно генераторы представляют собой трехфазную асинхронную

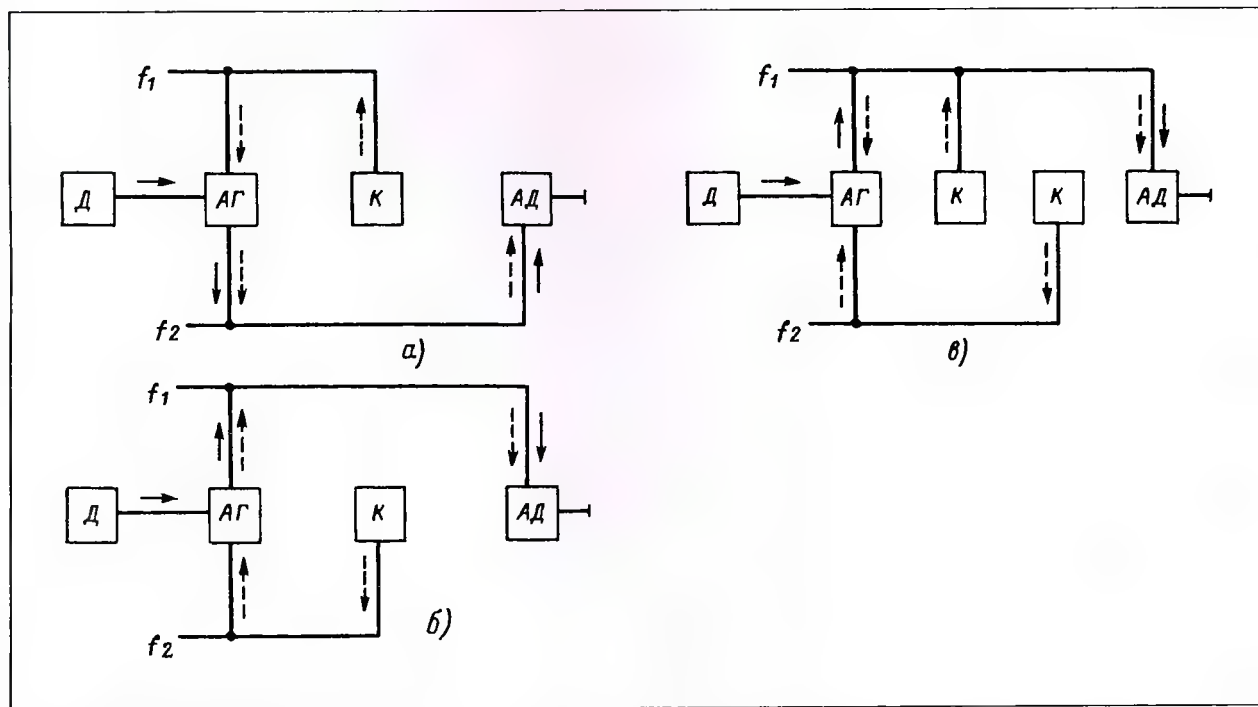


Рис. 5. Структурные схемы электроэнергетических установок с асинхронными генераторами переменной (регулируемой) частоты при включении конденсаторов:

а — со стороны статора; б — со стороны ротора; в — со стороны статора и ротора; Д — приводной двигатель; АГ — асинхронный генератор; АД — регулируемый асинхронный двигатель

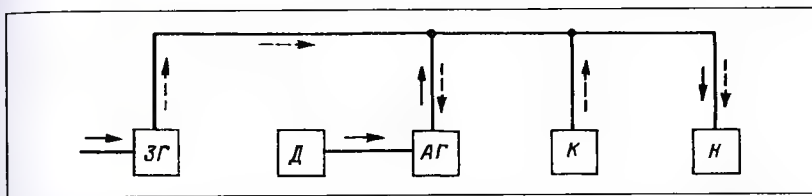


Рис. 6. Структурная схема электроэнергетической установки с асинхронным генератором независимого возбуждения (электромашинным усилителем мощности переменного тока):

ЗГ — задающий генератор; *Д* — приводной двигатель; *АГ* — асинхронный генератор; *К* — конденсатор; *Н* — нагрузка

машину с контактными кольцами, частота вращения которой поддерживается постоянной.

Регулирование частоты достигается изменением емкости, включенной в цепь статора или ротора. Для плавного изменения частоты в широком диапазоне емкость вводится как в первичную, так и во вторичную цепи машины (рис. 5).

Структурная схема автономной электроэнергетической установки с асинхронным генератором независимого возбуждения — асинхронным усилителем мощности переменного тока — приведена на рис. 6.

3. Уравнения асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением

Уравнения машин переменного тока, выражающие связи между токами и напряжениями, относятся к одной фазе. Входящие в них сопротивления по природе образования разделяются на *активные*, зависящие от размеров, материала проводников и температуры, и *индуктивные*, обусловленные переменными ЭДС.

Магнитный поток машины принято рассматривать состоящим из трех составляющих — *основного* Φ , замыкающегося по ферромагнитному магнитопроводу и воздушному зазору, или потока *взаимоиндукции*, и потоков *рассеяния* первичной $\Phi_{\sigma 1}$ и вторичной $\Phi_{\sigma 2}$ обмоток. Потоки рассеяния замыкаются вокруг проводников обмоток в основном по воздуху, вследствие чего они существенно ограничиваются.

Магнитные потоки, изменяясь, наводят в обмотках машины ЭДС, препятствующие изменениям тока, т.е. оказывающие ему сопротивление, называемое индуктивным. В соответствии с установленной классификацией составляющих магнитного поля машины различают: x_m — индуктивное сопротивление взаимоиндукции, обусловленное основным магнитным потоком; x_1 — индуктивное сопротивление рассеяния, обусловленное потоком рассеяния первичной обмотки; x'_2 — приведенное индуктивное сопротивление рассеяния, обусловленное потоком рассеяния вторичной обмотки.

Перечисленные индуктивные сопротивления, зависящие от индуктивностей соответствующих контуров, выражаются равенствами:

$$\left. \begin{aligned} x_m &= \omega_1 M; \\ x_1 &= \omega_1 L_{\sigma 1}; \\ x'_2 &= \omega_1 L'_{\sigma 2}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $\omega_1 = 2\pi f_1$ — угловая частота напряжения; M — коэффициент взаимоиндукции.

Полные или синхронные индуктивные сопротивления обмоток статора и приведенного ротора равны:

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= x_m + x_1; \\ X'_2 &= x_m + x'_2, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

или

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= \omega_1 L_1; \\ X'_2 &= \omega_1 L'_2, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где L_1 — полная, или собственная, индуктивность обмотки статора, L'_2 — то же, приведенного ротора.

Магнитное поле асинхронной машины в генераторном режиме вращается относительно статора и ротора в противоположные стороны. Поэтому электродвижущие силы $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$, индуцированные вращающимся магнитным полем в обмотках статора и ротора, находятся в противофазе.

Это обстоятельство вызывает определенные трудности при рассмотрении временной векторной диаграммы асинхронного генератора. Однако они легко устраняются, если исходить из представлений о трансформаторе с электрической связью контуров, эквивалентном по своим энергетическим показателям асинхронному генератору.

В трансформаторном режиме асинхронной машины статор и ротор неподвижны, а поле вращается относительно них с одной и той же угловой частотой ω . Ни двигательного, ни генераторного режима здесь нет, так как добавочное активное сопротивление в цепи ротора при скольжении $s = 1$ обращается в нуль:

$$r'_2 \frac{1-s}{s} = 0.$$

Основные уравнения автономного асинхронного генератора, приведенного к режиму работы трансформатором, принимают вид

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{E}_1 - \dot{I}_1 r_1 - j \dot{I}_1 x_1; \\ \dot{E}'_2 &= (j x'_2 - r'_2 / s) \dot{I}'_2; \\ \dot{I}_0 &= \dot{I}_1 + \dot{I}'_2. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

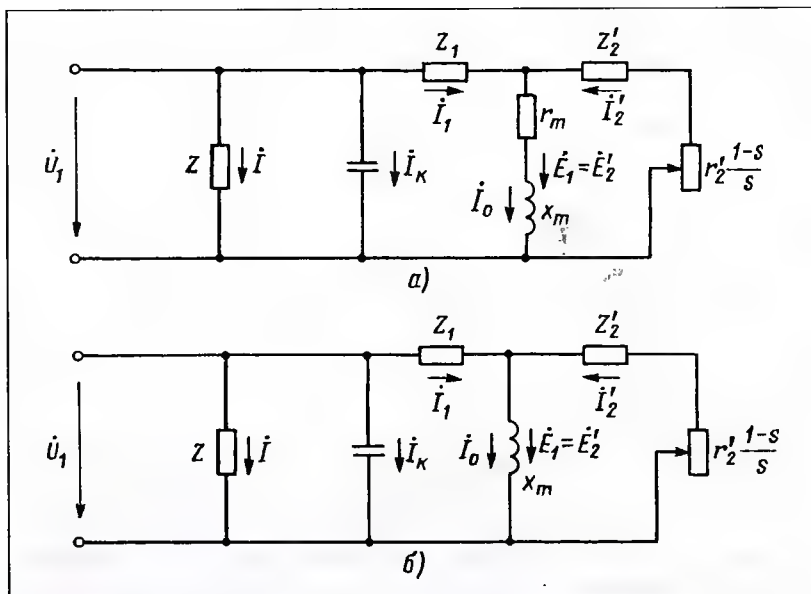


Рис. 7. Схемы замещения асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением — с учетом (а) и без учета (б) потерь в стали

Первое из них относится к напряжению $\dot{U}_1$ источника электрической энергии, которое меньше ЭДС $\dot{E}_1$ на значение внутреннего падения напряжения:

$$\Delta \dot{U} = \dot{I}_1 Z_1,$$

где $Z_1 = r_1 + jx_1$ — полное сопротивление фазы статора.

Из второго уравнения следует, что ЭДС $\dot{E}_2'$ уравнивается падениями напряжений на сопротивлениях цепи ротора.

Третье уравнение, если пренебречь током холостого хода I_0 , приводится к виду

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}_2',$$

откуда вытекает, что ток обмотки ротора направлен против тока обмотки статора, т.е. является размагничивающим.

Основным уравнениям соответствуют схемы замещения и векторная диаграмма асинхронного генератора. В правой части схем заме-

щения (рис. 7) показано активное добавочное сопротивление $r'_2 \frac{1-s}{s}$.

Вводя его условно в цепь ротора и придавая скольжению отрицательные значения, мы как бы включаем входную (роторную) обмотку на напряжение сети:

$$-\dot{U}'_2 = -\dot{I}'_2 r'_2 \frac{1-s}{s}, \quad (8)$$

причем

$$\left| r'_2 \frac{1-s}{s} \right| = \left| \frac{r'_2}{s} \right| + r'_2.$$

Сопротивление $r'_2 \frac{1-s}{s}$ можно назвать генерирующим элементом [8], так как активная мощность, развиваемая асинхронным генератором при данном скольжении s , или мощность на входе определяется из соотношения:

$$P'_2 = m_1 r'_2 \frac{1-s}{s} I'^2_2, \quad (9)$$

где m_1 — число фаз.

Часть этой мощности идет на покрытие электрических потерь в роторе, остальная часть электромагнитным путем передается в цепь статора и представляет собой *электромагнитную мощность*, имеющую отрицательный знак:

$$P_{эм} = m_1 I'^2_2 r'_2 / s, \quad (10)$$

что указывает на изменение ее передачи по сравнению с двигательным режимом.

В схему замещения кроме указанных параметров входят: полное приведенное сопротивление фазы ротора

$$Z'_2 = r'_2 + jx'_2;$$

индуктивное сопротивление взаимоиндукции

$$Z_m = r_m + jx_m,$$

где r_m — фиктивное активное сопротивление, которое вводится в схему замещения для учета потерь в сердечнике статора.

Векторная диаграмма генератора приведена на рис. 8. Как видно, ток статора $\dot{I}_1$ опережает напряжение $\dot{U}_1$ по фазе на угол φ_1 . Ток ротора $\dot{I}'_2$ отстает от ЭДС $\dot{E}'_2$ на угол ψ_2 , причем

$$\operatorname{tg} \psi_2 = -\operatorname{tg} \delta = -\operatorname{tg} \frac{s x'_2}{r'_2} > 0. \quad (11)$$

Ток конденсатора $\dot{I}_k$ опережает напряжение $\dot{U}_1$ на электрический угол $\pi/2$, рад.

Генерируемая мощность пропорциональна активной составляющей тока статора:

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1, \quad (12)$$

или

$$P_1 = m_1 U_1 \cdot OB.$$

Отрезок AB пропорционален реактивной мощности нагрузки; отрезок BC — пропорционален реактивной мощности генератора.

Если генерируемая активная мощность $P_1 = \text{const}$, то прямая AB является геометрическим местом концов векторов тока нагрузки.

Токи статора $\dot{I}_1$, нагрузки $\dot{I}$ и конденсатора $\dot{I}_k$ связаны зависимостью

$$\dot{I}_1 = \dot{I} + \dot{I}_k, \quad (13)$$

где

$$I_k = I_1 \sin \varphi_1 \pm I \sin \varphi. \quad (14)$$

Из последнего выражения следует, что если векторы тока нагрузки $\dot{I}$ и напряжения $\dot{U}_1$ сдвинуты по фазе на угол φ , то при $\varphi > 0$ имеет место неравенство $I_k > I_1 \sin \varphi_1$. Тогда ток конденсатора изобразится вектором

$$\dot{I}_k = \overline{AB} + \overline{BC}.$$

Составляющая этого вектора $\overline{AB} = \dot{I} \sin \varphi$.

По векторной диаграмме на рис. 8 можно определить энергетические показатели асинхронного генератора (без учета механических потерь).

4. Частота генерируемых колебаний при холостом ходе и нагрузке

Связь между угловой частотой вращения магнитного поля ω и угловой частотой вращения ротора ω_r асинхронной машины можно представить в виде соотношения

$$\omega = \frac{\omega_r}{1 - s}, \quad (15)$$

что следует из определения скольжения.

В общем случае угловая частота вращения магнитного поля

$$\omega = 2\pi n,$$

или так как частота генерируемых колебаний

$$f_1 = pn,$$

где p — число пар полюсов машины; n — частота вращения поля, с⁻¹, то

$$\omega = \frac{2\pi f_1}{p} = \frac{\omega_1}{p}, \quad (16)$$

где ω_1 — угловая частота напряжения генератора, рад/с.

Аналогично угловая частота вращения ротора

$$\omega_r = 2\pi n_r,$$

или

$$\omega_r = \frac{2\pi f_r}{p}, \quad (17)$$

где $f_r = pn_r$ — электрическая частота вращения ротора.

Электрическая угловая частота вращения ротора

$$\omega_r p = 2\pi f_r.$$

В режиме автономного асинхронного генератора частота вращения магнитного поля, определяющая частоту генерируемых колебаний (16), зависит от частоты вращения ротора и от нагрузки, характеризующейся скольжением, что вытекает из (15). Если нагрузка отсутствует, а включенная емкость и частота вращения ротора остаются постоянными, т.е. $C = \text{const}$, $\omega_r = \text{const}$, то частоту генерируемых колебаний можно выразить через параметры колебательного контура, который образуется собственной индуктивностью статорной обмотки и емкостью конденсатора.

При отмеченных условиях уравнение электрического равновесия, выраженное через мгновенные значения напряжений на синхронном индуктивном сопротивлении $X_1 = \omega_1 L_1$ и на конденсаторе, принимает вид

$$u_{L_1} + u_C = 0.$$

После подстановок

$$u_{L_1} = L_1 \frac{di_1}{dt}$$

и

$$\frac{di_1}{dt} = C \frac{d^2 u_C}{dt^2},$$

где

$$i_1 = C \frac{du_C}{dt},$$

и преобразований, уравнение принимает вид

$$\frac{d^2 u_C}{dt^2} + \frac{u_C}{L_1 C} = 0. \quad (18)$$

Примем, что напряжение на конденсаторе изменяется по синусоидальному закону:

$$u_C = U_{Cm} \sin \omega_1 t,$$

тогда

$$\frac{d^2 u_C}{dt^2} = -\omega_1^2 U_{Cm} \sin \omega_1 t.$$

С учетом последних соотношений из дифференциального уравнения (18) находим:

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C}}, \quad (19)$$

откуда

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C}}. \quad (20)$$

Таким образом, частота генерируемых колебаний при холостом ходе автономного асинхронного генератора определяется из условия резонанса емкости конденсатора и собственной индуктивности обмотки статора.

Если принять, что при холостом ходе скольжение $s = 0$, то из соотношения (15) получим

$$\omega \approx \omega_r \quad (21)$$

Разрешим это выражение относительно электрической частоты вращения ротора. Так как $\omega = \omega_1/p$, то

$$\omega_1 \approx p\omega_r$$

откуда

$$f_1 \approx pn_r = f_r \quad (22)$$

Последнее выражение с учетом (20) можно представить в виде

$$f_r \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C}}. \quad (23)$$

Следовательно, *при холостом ходе асинхронного самовозбуждающегося генератора параметры колебательного контура автоматически настраиваются на частоту, равную электрической частоте вращения ротора.*

Изменение значения включенной емкости при $\omega_r = \text{const}$ или частоты вращения ротора при $C = \text{const}$ не нарушает равенств (19) и (20), если генератор остается в области устойчивой работы. В первом случае мы имеем одну характеристику намагничивания машины, соответствующую данному значению частоты вращения, и семейство вольт-амперных характеристик возбуждающей емкости, причем каждая из характеристик составляет с положительным направлением оси абсцисс угол

$$\alpha_k = \arctg \frac{1}{\omega_l C_k},$$

где $k = 1, 2, 3, \dots$

Произведение собственных индуктивностей статорной обмотки и емкости конденсаторов остается практически постоянным, т.е.

$$L_{1k} C_k = \text{const},$$

так как вследствие нелинейности кривой намагничивания происходит соответствующее изменение индуктивности. Так, с увеличением емкости ток холостого хода и степень насыщения магнитной цепи возрастают, а индуктивность L_1 уменьшается. Значение установившегося напряжения определяется точкой пересечения кривой намагничивания и вольт-амперной характеристики конденсаторов.

Во втором случае, т.е. при переходе к новым значениям установившихся частот вращения с емкостью $C = \text{const}$, мы имеем семейство кривых намагничивания и семейство вольт-амперных характери-

стик возбуждающей емкости. Углы наклона последних к положительному направлению оси абсцисс находятся теперь по соотношению

$$\alpha_k = \arctg \frac{1}{\omega_1 C}.$$

Значение установившегося напряжения в каждом случае определяется точкой пересечения кривой намагничивания и вольт-амперной характеристики конденсаторов для данной угловой частоты ω_{1k} .

Получим теперь выражение для частоты генерируемых колебаний при нагрузке, полагая, что емкость конденсаторов и частота вращения ротора не изменяются. Подставим в соотношение (15) значение угловой частоты вращения поля из равенства (16), а значение угловой частоты вращения ротора — из равенства (17). Произведя сокращения, получим

$$f_1 = \frac{f_r}{1-s}, \quad (24)$$

или

$$f_1 = \frac{pn_r}{1-s}. \quad (25)$$

Заметим, что частота вращения ротора в последнем соотношении имеет размерность s^{-1} . Если она выражается в мин^{-1} , то вместо (25) получаем

$$f_1 = \frac{pn}{60(1-s)}. \quad (26)$$

Частота генерируемых колебаний при постоянной частоте вращения ротора и возрастающей нагрузке несколько уменьшается, так как на устойчивой части механической характеристики асинхронной машины скольжение пропорционально нагрузке.

С другой стороны, уменьшение частоты f_1 при $C = \text{const}$ объясняется в соответствии с (20) увеличением собственной индуктивности фазы статора вследствие возрастания коэффициента взаимоиндукции. Последнее вызывается размагничивающим действием тока ротора.

5. Физические основы самовозбуждения

Асинхронный генератор представляет собой нелинейную автоколебательную систему с двумя накопителями энергии — емкостью и индуктивностью.

При определенных условиях в цепи невозбужденной вращающейся машины возникают незатухающие колебания, амплитуда которых возрастает до определенного значения, зависящего от параметров колебательного контура. Заметим, что по способу возбуждения автоколебательные системы разделяются на системы с жестким и мягким возбуждением. В первом случае колебания начинаются после того, как система получила некоторый определенный толчок, во втором — этот толчок может быть исчезающе малым. Однако всегда для возникновения колебаний необходимо, чтобы в цепь статора поступала мощность, компенсирующая потери в активных сопротивлениях колебательного контура.

Очевидно, что передача энергии в направлении от ротора к статору может быть достигнута только в результате образования вращающего момента, обусловленного взаимодействием поля ротора со свободными составляющими поля статора, вращающимися в направлении вращения ротора с некоторым отставанием. Соответствующее отрицательное скольжение весьма мало, поэтому собственная частота колебаний контура практически равна электрической частоте вращения ротора (22).

Из условий самовозбуждения, выраженных в виде соотношения (22), вытекает как следствие, что потери в колебательном контуре должны быть незначительны.

Свободные составляющие потока статора, вращающиеся в сторону вращения ротора, но с большей частотой, так же как и свободные составляющие потока, вращающиеся в противоположном направлении, демпфируются обмоткой ротора и затухают.

Самовозбуждение асинхронного генератора представляет собой переходный электромагнитный процесс, вызываемый преднамеренно в целях генерирования электрической энергии.

Методика аналитического исследования условий самовозбуждения заключается в следующем:

1) составляются дифференциальные уравнения с постоянными коэффициентами, описывающие переходный процесс в рассматриваемой системе;

2) находится характеристическое уравнение системы;

3) определяются корни характеристического уравнения.

Самовозбуждение возможно, если по меньшей мере один из корней имеет положительную вещественную часть.

Гармоническая составляющая свободного тока определяется соотношением:

$$i'_{cb} = I'_{cb} e^{\beta t} \sin(\omega_1 t + \psi_{i'_{cb}}), \quad (27)$$

где $\beta = -\frac{R}{2L_1}$ — коэффициент затухания; $\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{L_1 C} - \left(\frac{R}{2L_1}\right)^2}$ — собственная частота колебаний; $\psi_{i'_{cb}}$ — начальная фаза тока.

Активное сопротивление R , входящее в выражение коэффициента затухания, является функцией параметров схемы замещения и частоты вращения ротора. Если $R > 0$, то коэффициент затухания $\beta < 0$ и возбуждение колебаний, как это видно из соотношения (27), становится невозможным.

Для возникновения самовозбуждения необходимо, чтобы активное сопротивление R было отрицательным. При этом $\beta > 0$ и в соответствии с (27) происходит нарастание амплитуды свободного тока. Напряжение на зажимах машины соответственно возрастает.

По мере увеличения напряжения реактивное сопротивление взаимной индукции x_m уменьшается вследствие насыщения магнитной цепи машины. Вместе с этим происходит уменьшение абсолютного значения отрицательного активного сопротивления. Нарастание амплитуды свободного тока заканчивается, когда сопротивление R и, соответственно, коэффициент затухания обращаются в нуль.

Возникающий под влиянием внешнего электромагнитного возмущения или под влиянием ЭДС, обусловленной остаточным полем ротора, ток статорной цепи, опережающий напряжение генератора на угол, примерно равный $\pi/2$ рад, по отношению к генератору является реактивным намагничивающим током. Возбуждение становится

возможным, если потери, обусловленные этим током, компенсируются за счет энергии, поступающей со стороны ротора, вращающегося с некоторым весьма небольшим отрицательным скольжением. В этом и состоят физические основы самовозбуждения асинхронного генератора.

Сложным в теоретическом отношении является обоснование причин возникновения колебаний. Положим, что необходимым и достаточным условием для этого является наличие остаточной ЭДС ротора. Тогда процесс самовозбуждения будет протекать так же, как и в генераторе постоянного тока. Графически он может быть условно представлен ступенчатой линией, проходящей между кривой намагничивания и вольт-амперной характеристикой конденсатора (рис. 9).

Как видно, переходный процесс характеризуется неравенством

$$(x_1 + x_m)i_{0r} > \frac{i_k}{\omega_1 C},$$

где i_k — мгновенное значение тока конденсатора.

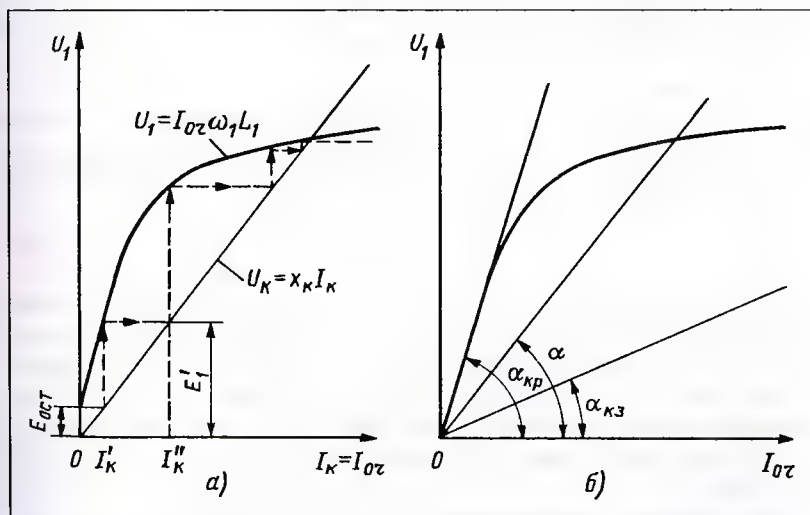


Рис. 9. Самовозбуждение асинхронного генератора с остаточным полем ротора: а — графическое изображение процесса самовозбуждения; б — характеристики намагничивания

Точка пересечения характеристик соответствует установившемуся режиму, для которого справедливо равенство

$$\omega_1(L_{cl} + L_m) = \frac{1}{\omega_1 C}. \quad (28)$$

Решение последнего выражения относительно угловой частоты генерируемых колебаний ω_1 приводит к соотношению (19).

Касательная к кривой намагничивания (рис. 9, б) представляет собой характеристику холостого хода при $X_1 = \text{const}$. Она составляет с осью абсцисс угол $\alpha_{кр} = \arctg X_1$.

Другое предельное значение магнитной характеристики $U_1 = f(I_{0r})$ выражается характеристикой короткого замыкания ($X_1 = \text{const}$). Характеристика короткого замыкания составляет с осью абсцисс угол

$$\alpha_{к.з} = \arctg \omega_1 L_{к.з.1},$$

где $L_{к.з.1}$ — полная индуктивность фазы генератора при коротком замыкании.

Как следует из изложенного, по условию самовозбуждения вольт-амперная характеристика конденсатора должна составлять с осью абсцисс угол α , лежащий в пределах:

$$\alpha_{кр} > \alpha > \alpha_{к.з}.$$

Этому соотношению соответствует неравенство реактивных сопротивлений:

$$X_1 > X_C > X'_1. \quad (29)$$

Рассмотренная картина процесса самовозбуждения асинхронного генератора с ферромагнитным короткозамкнутым ротором достаточно проста и наглядна. Однако она не отражает того обстоятельства, что обычно асинхронному возбуждению предшествует устойчивая работа машины со скольжением, равным нулю, т.е. в режиме гистерезисного синхронного генератора, включенного на емкостную нагрузку.

Образование гистерезисного момента обусловлено взаимодействием вращающегося магнитного поля статора с полем элементарных магнитов ротора, которые поворачиваются (вращаются) в направлении поля с некоторым отставанием.

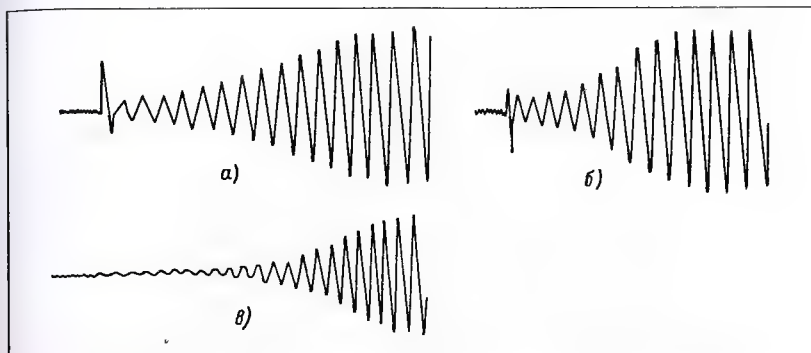


Рис. 10. Осциллограммы тока статора, полученные при самовозбуждении асинхронного генератора:

$a - C_1 = \text{const}; \omega_r = \text{const}; б - C_2 = \text{const} (C_2 > C_1); \omega_r = \text{const}; в - C = \text{const}; \omega_r \text{ возрастает от нуля}$

С включением конденсаторов увеличивается ток статора, возрастают угол нагрузки θ и момент. При достижении последним максимального значения генератор выпадает из синхронизма, а ротор начинает вращаться с некоторым скольжением. В его обмотке возникают ЭДС и токи, образуется асинхронный электромагнитный вращающий момент. В результате синхронные колебания переходят в асинхронные.

Если же емкость, введенная в цепь обмотки статора, мала, то угол нагрузки θ не достигнет максимального значения — генератор не выпадет из синхронизма и короткозамкнутая обмотка ротора будет выполнять роль демпферной клетки при колебаниях угла нагрузки. Переход к асинхронному возбуждению сопровождается толчком — происходит жесткое самовозбуждение.

Осциллограммы, приведенные на рис. 10, a и $б$, иллюстрируют картину жесткого возбуждения. На них явно обозначен момент толчка, после которого происходит нарастание амплитуды колебаний.

Обратим теперь внимание на осциллограмму, приведенную на рис. 10, $в$. Толчка, характерного для жесткого самовозбуждения, мы здесь не обнаруживаем. Осциллограмма получена следующим образом. В цепь обмотки статора неподвижного генератора введена емкость, достаточная для возбуждения до номинального напряжения в режиме холостого хода. Затем генератор приводится во вращение и запись осциллограммы производится в условиях уменьшающегося скольжения, т.е. в чисто асинхронном режиме. Этот способ возбуждения принципиально отличается от предыдущих. Здесь нет синхро-

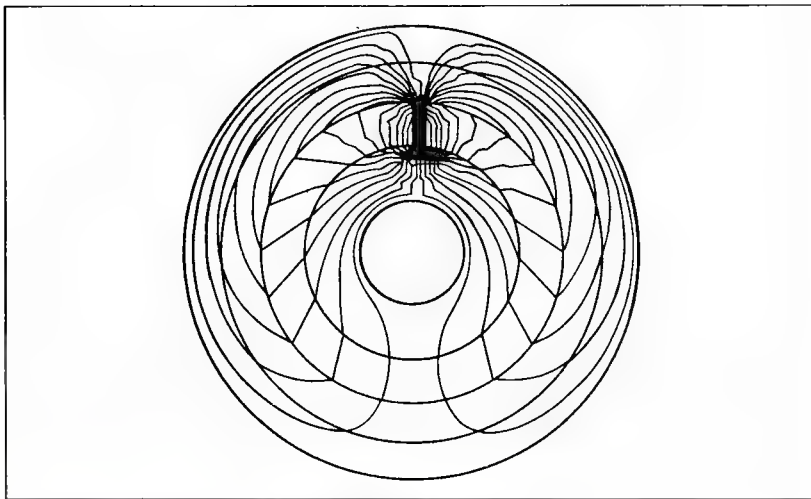


Рис. 11. Магнитное поле постоянного магнита

нного режима и амплитуда колебаний плавно возрастает от нуля до установившегося значения. Из изложенного становится очевидным, что для асинхронного генератора возможны как жесткий, так и мягкий способы возбуждения.

Описанное относится к асинхронному генератору с ферромагнитным короткозамкнутым ротором, обладающим некоторым остаточным магнитным полем. Однако самовозбуждение возможно и при полном отсутствии последнего, например, у генератора с полым немагнитным ротором. В этом случае в токе статора должны содержаться составляющие, создающие магнитное поле, вращающееся в сторону вращения ротора с некоторым отставанием.

Заметим, что к одному из важных вопросов, связанных с эксплуатацией автономных электроэнергетических установок с асинхронными генераторами, относится обеспечение надежности процесса самовозбуждения.

Отечественными учеными предложен оригинальный и простой способ решения отмеченной проблемы. Он основан на дополнении к конструкции сердечников статора или ротора постоянных магнитов в виде стержней, например по одному на пару полюсов.

Картина распределения магнитного поля постоянного магнита, полученная расчетным путем, приведена на рис. 11. Как показали исследования, самовозбуждение становится гарантированным [1].

6. Характеристики автономных асинхронных генераторов с конденсаторным возбуждением

Если выполняются условия $\omega_r = \text{const}$, $C = \text{const}$, то с включением генератора на нагрузку согласно (26) происходит уменьшение частоты.

Генерирование электрических колебаний переменной частоты при отмеченных условиях является характерной отличительной особенностью автономного асинхронного генератора. Принципиально возможно также получение постоянной частоты. Для этого достаточно осуществлять такое регулирование частоты вращения ротора, при котором частота вращения магнитного поля будет оставаться постоянной. В связи с этим применительно к автономному асинхронному генератору различают характеристики при постоянной (номинальной) частоте вращения и характеристики при постоянной (номинальной) частоте.

К основным характеристикам относятся: характеристика холостого хода, внешняя, нагрузочная, регулировочная и частотная.

В режиме холостого хода скольжение $s \approx 0$. Поэтому *характеристика холостого хода* при постоянной частоте вращения ротора совпадает с характеристикой при постоянной частоте:

$$U_1 = \varphi(I_0)$$

при $\omega_r = \omega_{\text{н}} = \text{const}$; $f_1 = \text{const}$; $I = 0$.

Внешняя характеристика автономного асинхронного генератора представляет собой зависимость напряжения на его зажимах от тока нагрузки при условии постоянства частоты вращения ротора, емкости конденсаторов и коэффициента мощности нагрузки, т.е.

$$U_1 = f(I)$$

при

$$\omega_r = \omega_{rn} = \text{const}; C = \text{const}; \cos \varphi = \text{const},$$

или соответственно

$$U_1 = F(I)$$

при

$$f_1 = f_{1n} = \text{const}; C = \text{const}; \cos \varphi = \text{const},$$

где I — ток нагрузки; φ — фазовый угол сдвига между током и напряжением нагрузки.

Нагрузочная характеристика:

$$U_1 = f(I_0)$$

при

$$\omega_r = \omega_{rn} = \text{const}; I = \text{const}; \cos \varphi = \text{const},$$

или соответственно

$$U_1 = F(I_0)$$

при

$$f_1 = f_{1n} = \text{const}; I = \text{const}; \cos \varphi = \text{const}.$$

Регулировочная характеристика:

$$C = f(I)$$

при

$$U_1 = \text{const}; \omega_r = \omega_{rn} = \text{const}; \cos \varphi = \text{const},$$

или соответственно

$$C = F(I)$$

при

$$U_1 = \text{const}; f_1 = f_{1н} = \text{const}; \cos \varphi = \text{const}.$$

Частотная характеристика позволяет судить об изменении частоты с изменением нагрузки. Поэтому ее относят к постоянной частоте вращения ротора:

$$f_1 = F(I)$$

при

$$\omega_r = \omega_{рн} = \text{const}; C = \text{const}; \cos \varphi = \text{const}.$$

Номинальная частота вращения может быть выбрана по номинальной частоте при холостом ходе или номинальной нагрузке. В первом случае в соотношение (25) подставляется значение скольжения $s = 0$, во втором — $s = s_{ном}$. По условию ограничения намагничивающего тока за номинальную частоту вращения ротора автономного асинхронного генератора, в качестве которого часто используется асинхронный двигатель, целесообразно принимать частоту, соответствующую номинальной частоте при номинальной нагрузке.

Характеристика холостого хода, нагрузочные характеристики генератора и вольт-амперные характеристики конденсатора при постоянной частоте вращения ротора ($\omega_r = \text{const}$, $f_1 = \text{var}$) показаны на рис. 12.

Вольт-амперные характеристики конденсатора соответствуют одной и той же емкости ($C = \text{const}$). Характеристика холостого хода (без учета остаточной ЭДС) изображена кривой, проходящей через начало координат. Точке ее пересечения M с вольт-амперной характеристикой конденсатора (прямой OM) соответствует установившийся режим, характеризующийся напряжением U_{10} и током холостого хода I_{01} .

После включения генератора на нагрузку координаты рабочей точки, т.е. точки пересечения магнитной (нагрузочной) характеристики машины и вольт-амперной характеристики конденсатора, изменяются вследствие изменения напряжения и тока холостого хода.

С переходом от режима холостого хода к режиму с номинальной нагрузкой рабочая точка перемещается из положения M на характеристике холостого хода в положение N на нагрузочной характеристике ONB . Вольт-амперная характеристика конденсатора поворачивается в направлении против часовой стрелки на угол $\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_0$, соответ-

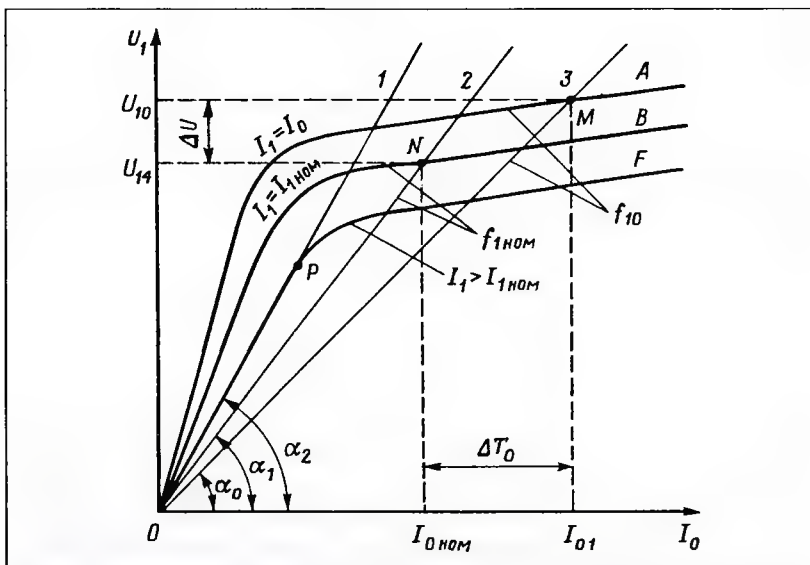


Рис. 12. Характеристика холостого хода (OMA), нагрузочные характеристики (ONB, OPF) и вольт-амперные характеристики конденсаторов (1 – 3) асинхронного генератора при $\omega_r = \text{const}$

ствующий приращению реактивного сопротивления конденсатора, обусловленному уменьшением частоты.

Изменения напряжения и тока холостого хода при переходе режима от холостого хода к режиму с номинальной нагрузкой определяются по соотношениям:

$$\Delta U = U_{10} - U_{1\text{ном}};$$

$$\Delta I_0 = I_{01} - I_{0\text{ном}}.$$

По мере увеличения нагрузки вольт-амперная характеристика конденсатора продолжает поворачиваться против часовой стрелки, а рабочая точка перемещаться в направлении к точке P . При этом генератор все более размагничивается, что сопровождается уменьшением напряжения на его зажимах. С переходом рабочей точки в ненасыщенную область OP напряжение резко исчезает. Режим самовозбуждения сохраняется до некоторой определенной нагрузки, характеризующей *предел статической устойчивости машины*.

Заметим, что если экспериментальное получение характеристик автономного асинхронного генератора переменной частоты при $\omega_r = \text{const}$ осуществляется довольно просто, то теоретическое исследование режимов его работы встречает значительные затруднения. Так как каждой произвольно взятой нагрузке соответствует вполне определенная частота, то все реактивные параметры системы асинхронный генератор — нагрузка становятся функциями скольжения, причем практически отпадает возможность использования такого метода анализа, как метод круговых диаграмм. Из этого следует, что *целесообразнее рассматривать характеристики автономного асинхронного генератора постоянной частоты с переменной частотой вращения ротора*. Тогда все режимы работы генератора могут быть исследованы с помощью схем замещения, векторных и круговых диаграмм.

7. Стабилизация напряжения автономных асинхронных генераторов с конденсаторным возбуждением

Одной из наиболее важных проблем, возникающих при использовании асинхронных генераторов с конденсаторным возбуждением в автономных системах электроснабжения, является стабилизация напряжения при изменяющейся нагрузке.

Частота вращения генераторов может быть регулируемой по условию постоянства частоты генерируемых колебаний ($f_1 = \text{const}$, $\omega_r = \text{var}$) или оставаться постоянной ($\omega_r = \text{const}$, $f_1 = \text{var}$). В более общем случае возможна работа генератора с переменной частотой вращения и переменной частотой f_1 ($\omega_r = \text{var}$, $f_1 = \text{var}$).

Решение отмеченной проблемы диктуется, с одной стороны, необходимостью улучшения качества электроэнергии, с другой — соображениями устойчивости. Последнее вытекает из того, что при снижении напряжения до уровня, соответствующего переходу рабочей точки на линейный участок характеристики намагничивания, работа генератора становится неустойчивой.

Рассмотрим причины изменения напряжения. Воспользуемся для анализа Г-образной схемой замещения генератора, в которой параметры намагничивающего контура вынесены на зажимы сети. Упрощенная схема замещения приведена на рис. 13. Правую часть схемы с током I_2'' образует главный контур. Векторное уравнение токов принимает вид

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{00} + (-\dot{I}_2''), \quad (30)$$

где $\dot{I}_{00}$ — ток генератора при $s = 0$ (ток синхронизма).

Индуктивное сопротивление намагничивающего контура определяется по первой формуле системы (5), причем имеет место неравенство $X_1 \gg r_1$.

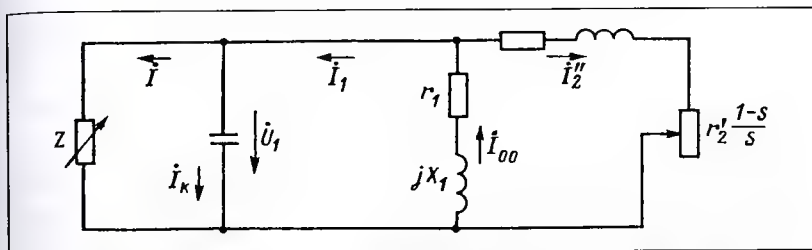


Рис. 13. Упрощенная Г-образная схема замещения асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением

Потери в стали не учитываются. Пренебрежение ими вносит лишь несущественные погрешности при определении токов и напряжений. В то же время количественный учет потерь, вызываемых поверхностным эффектом, гистерезисом и вихревыми токами в переходных режимах, значительно осложняется из-за наличия в магнитном потоке составляющих различных частот.

Устанавливающееся на зажимах генератора напряжение зависит от баланса реактивных проводимостей системы. Если нагрузка носит активный характер, то между реактивными проводимостями намагничивающего b_0 и главного b_2' контуров и конденсаторов b_C устанавливается следующая зависимость:

$$b_0 + b_2' - b_C = 0, \quad (31)$$

где в соответствии со схемой замещения (см. рис. 13):

$$\left. \begin{aligned} b_0 &\approx 1 / X; \\ b_2' &= (I_2'' / U_1)^2 \cdot \operatorname{Im} \dot{U}_1 / I_2''; \\ b_C &= \omega_1 C. \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

Из (31) следует, что реактивные проводимости намагничивающего и главного контуров компенсируются реактивной проводимостью конденсаторов, являющихся источниками реактивной намагничивающей мощности.

Представим соотношение (31) в виде

$$\frac{I_{00r}}{U_1} = \omega_1 C - \frac{I_2''}{U_1} \sin \alpha, \quad (33)$$

где угол сдвига фаз между напряжением $\dot{U}_1$ и током $\dot{I}_2''$

$$\alpha = \arctg \frac{\operatorname{Im} \dot{U}_1 / \dot{I}_2''}{\operatorname{Re} \dot{U}_1 / \dot{I}_2''}. \quad (34)$$

Напряжение генератора определяется реактивной проводимостью намагничивающего контура. При $C = \text{const}$ проводимость b_0 зависит от нагрузки. Изменение последней вызывает противоположное изменение реактивной проводимости намагничивающего контура. Так, с увеличением нагрузки возрастает реактивная проводимость главного контура, а проводимость намагничивающего контура и напряжение на зажимах машины уменьшаются. Уменьшение нагрузки приводит к обратному результату. При холостом ходе $s \approx 0$, $I_2'' \approx 0$ и реактивная проводимость намагничивающего контура становится наибольшей:

$$\frac{I_{00r}}{U_1} = \omega_1 C. \quad (35)$$

Баланс реактивных проводимостей в общем случае описывается уравнением

$$\sum_{k=1}^n b_k = 0, \quad (36)$$

т.е. алгебраическая сумма реактивных проводимостей системы асинхронный генератор — нагрузка равна нулю.

В случае смешанной нагрузки имеем

$$b_0 + b_2' - b_C \pm b = 0, \quad (37)$$

где b — реактивная проводимость нагрузки — индуктивной ($b > 0$) или емкостной ($b < 0$).

Если нагрузка носит активно-индуктивный характер, то реактивная проводимость нагрузки:

$$b = \frac{I_L}{U_1}, \quad (38)$$

где $I_L = I \sin \varphi$ — реактивная составляющая тока нагрузки.

Уравнение баланса реактивных проводимостей принимает вид

$$b_0 + b_2' - b_C + b = 0, \quad (39)$$

откуда

$$\frac{I_{00r}}{U_1} = \omega_1 C - \frac{I_2''}{U_1} \sin \alpha - \frac{I}{U_1} \sin \varphi. \quad (40)$$

Реактивная проводимость намагничивающего контура, определяющая устанавливающееся на зажимах генератора напряжение, при постоянной емкости и изменяющейся нагрузке не остается постоянной. Она уменьшается при возрастании проводимостей главного контура и нагрузки и возрастает при их уменьшении.

Решение (40) относительно намагничивающего тока дает:

$$I_{00r} = I_k - I_2'' \sin \alpha - I \sin \varphi, \quad (41)$$

где $I_k = U_1 \omega_1 C$ — ток конденсатора.

Ток I_{00} создает основной магнитный поток Φ , индуцирующий в фазе статора ЭДС E_1 .

При синусоидальном распределении магнитной индукции в воздушном зазоре

$$E_1 = 4,44 f_1 w_1 k_{об1} \Phi, \quad (42)$$

или

$$E_1 = c_e f_1 \Phi, \quad (43)$$

где

$$c_e = 4,44 w_1 k_{об1}.$$

Последнее выражение можно представить также в виде

$$E_1 = c_e f_1 \varphi(I_{00r}), \quad (44)$$

так как основной магнитный поток является функцией намагничивающего тока.

Выражение для ЭДС фазы генератора с учетом (25) и (41) принимает вид

$$E_1 = c_e \frac{pn_r}{1-s} \varphi(I_k - I_2'' \sin \alpha - I \sin \varphi). \quad (45)$$

Из (45) следует, что ЭДС E_1 автономного асинхронного генератора при данных частоте вращения ротора и возбуждающей емкости зависит от значения и характера нагрузки.

С увеличением нагрузки при $f_1 = \text{const}$, $C = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$, $\varphi \geq 0$ напряжение генератора уменьшается вследствие уменьшения ЭДС E_1 и увеличения внутреннего падения напряжения. Уменьшение ЭДС E_1 вызывается ослаблением основного магнитного потока.

Если в режиме внешней характеристики частота вращения ротора поддерживается постоянной, то к некоторому уменьшению ЭДС приводит, кроме того, уменьшение частоты генерируемых колебаний.

К ослаблению основного магнитного потока приводят размагничивающее действие вторичного тока, увеличение реактивной составляющей тока нагрузки (при $\varphi > 0$) и уменьшение емкостного тока. Последнее при $f_1 = \text{const}$ обуславливается уменьшением напряжения, а при $n_r = \text{const}$ — уменьшением напряжения и частоты.

Таким образом, причинами изменения напряжения асинхронного генератора в режиме внешней характеристики при $f_1 = \text{const}$ являются изменение основного магнитного потока и внутреннего падения напряжения. Если же частота вращения ротора поддерживается постоянной, то изменение напряжения вызывается, кроме того, изменением частоты.

Из рассмотрения соотношений (43) и (45) следует, что стабилизация напряжения генератора при изменяющейся нагрузке принципиально возможна посредством регулирования частоты вращения ротора (частоты f_1) и регулирования основного магнитного потока.

Осуществление стабилизации напряжения по первому способу технически сложно, особенно при резко переменной нагрузке. Пределы регулирования частоты вращения ротора здесь могут быть значительными. Поэтому такой способ практически непригоден.

Вторая возможность стабилизации напряжения является основной. Частота вращения ротора при этом может быть постоянной или переменной. В последнем случае диапазон регулирования магнитного потока увеличивается.

Выше было показано, что напряжение генератора при данной частоте вращения определяется реактивной проводимостью b_0 намагничивающего контура. Следовательно, для стабилизации напряжения необходимо выполнение условия:

$$b_0 = b_C - (b'_2 \pm b) = \text{const.} \quad (46)$$

Отсюда применительно к активно-индуктивной нагрузке

$$b_0 = b_C - (b'_2 + b) = \text{const} \quad (47)$$

и к активной нагрузке

$$b_0 = b_C - b'_2 = \text{const.} \quad (48)$$

Реактивной проводимости b_C соответствует реактивная мощность конденсаторов:

$$Q_k = m_1 \omega_1 C U_\phi^2, \quad (49)$$

где C , U_ϕ — емкость и напряжение фазы конденсаторов.

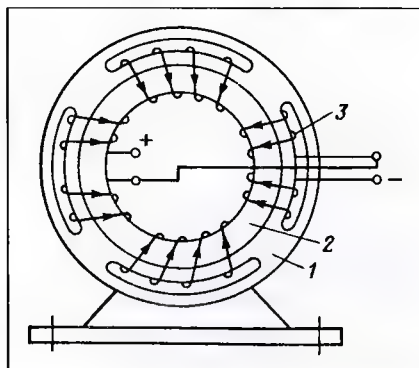
Из этого выражения видно, что получение необходимой реактивной мощности конденсаторов при изменяющейся нагрузке может быть обеспечено регулированием емкости C или напряжения U_ϕ . Обе эти возможности используются на практике.

Условимся рассматривать стабилизацию напряжения асинхронного генератора при постоянной частоте вращения ротора.

Регулирование основного магнитного потока в целях стабилизации напряжения при $n_2 = \text{const}$ возможно:

- 1) подмагничиванием спинки статора генератора;
- 2) изменением напряжения на конденсаторах;
- 3) изменением емкости шунтирующих конденсаторов;
- 4) применением феррорезонансного стабилизатора напряжения;
- 5) применением управляемых реакторов;
- 6) применением конденсаторов с переменной (регулируемой) диэлектрической проницаемостью;
- 7) компаундированием возбуждения.

Эффект плавного регулирования напряжения при постоянной емкости конденсаторов может быть достигнут *подмагничиванием*



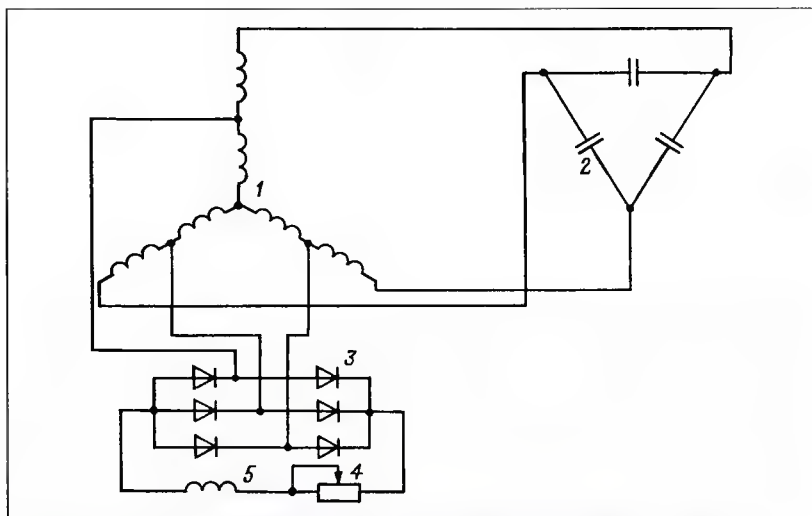


Рис. 15. Схема асинхронного генератора с подмагничивающей обмоткой:

1 — трехфазная обмотка статора; 2 — шунтирующие конденсаторы; 3 — выпрямительный мост; 4 — регулировочный реостат; 5 — обмотка подмагничивания

спинки статора генератора. Для подмагничивания используется постоянный или переменный ток.

Поток подмагничивания замыкается по сердечнику статора. Мощность подмагничивания незначительна, если сталь сердечника не насыщена. При работе генератора с насыщением магнитной цепи эта мощность существенно возрастает и может достигать 10 % мощности, развиваемой генератором.

Рассматриваемый способ регулирования напряжения основывается на изменении степени насыщения спинки статора. С возрастанием нагрузки ток подмагничивающей обмотки необходимо уменьшать. Уменьшение реактивной проводимости намагничивающего контура при этом ограничивается настолько, что напряжение генератора в определенных пределах изменения нагрузки остается практически постоянным.

Принципиальная схема расположения подмагничивающей обмотки, обтекаемой постоянным током, приведена на рис. 14. Ее секции соединены между собой так, что результирующая переменная ЭДС обмотки, наведенная вращающимся магнитным полем, равна нулю.

Для питания обмотки подмагничивания возможно использование части трехфазной обмотки статора, как показано на рис. 15. Обмотка

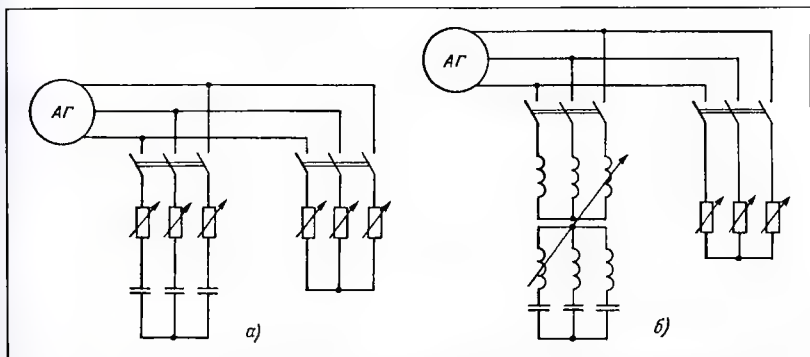


Рис. 16. Схемы асинхронного генератора с регулированием напряжения на конденсаторах посредством:

а — активных сопротивлений; б — трансформатора с переменным коэффициентом трансформации

подмагничивания 5 соединена с трехфазной обмоткой статора 1 посредством выпрямительного моста 3. В ее цепь включен регулировочный реостат 4. Возможно также применение нескольких обмоток подмагничивания. По одной из предложенных в Великобритании схем изменение степени насыщения спинки статора достигается с помощью двух дифференциально действующих обмоток. Ток одной из них пропорционален напряжению, ток другой равен току нагрузки. Поэтому с увеличением нагрузки насыщение спинки статора уменьшается автоматически.

К недостаткам способа относятся следующие:

1) генератор должен иметь специальное исполнение с дополнительными статорными обмотками для подмагничивания;

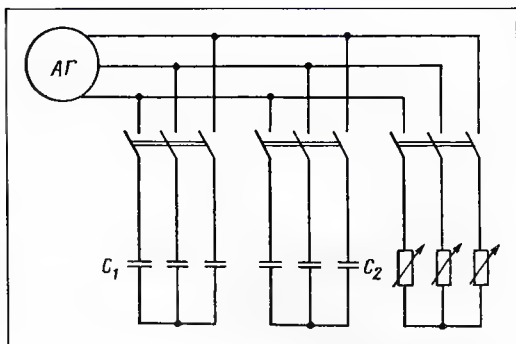


Рис. 17. Схема асинхронного генератора с двухступенчатым регулированием емкости шунтирующих конденсаторов

2) стабилизация напряжения в широком диапазоне изменения нагрузки не обеспечивается.

Изменение напряжения на конденсаторах. Если в цепь конденсаторов, включенных на линейное или фазное напряжение, ввести реостат и изменять его сопротивление, то напряжение на конденсаторах станет регулируемым (рис. 16, а). Очевидно, что с введением реостата оно уменьшается.

Регулирование реактивной мощности конденсаторов в необходимых пределах по условию поддержания постоянства напряжения $U_1 = \text{const}$ при $C = \text{const}$ обеспечивается соответствующим подбором параметров схемы.

Этого же результата можно достичь посредством трансформатора с регулируемым коэффициентом трансформации, первичная обмотка которого включена на напряжение генератора, а вторичная замкнута на конденсаторы (рис. 16, б).

К недостаткам способа относятся:

1) неэкономичность, обусловленная в первом случае потерями в регулировочных реостатах, во втором — установкой трансформатора, мощность которого соизмерима с мощностью генератора;

2) наличие коммутационной аппаратуры, усложняющей эксплуатацию генераторной установки;

3) увеличенная емкость при использовании в схеме трансформатора. Она должна быть достаточной для компенсации реактивной мощности генератора, нагрузки (при $\varphi > 0$) и трансформатора.

Изменение емкости шунтирующих конденсаторов. Регулирование основного магнитного потока изменением емкости шунтирующих конденсаторов в наиболее простом случае осуществляется посредством использования в схеме двух конденсаторных батарей (двухступенчатое регулирование).

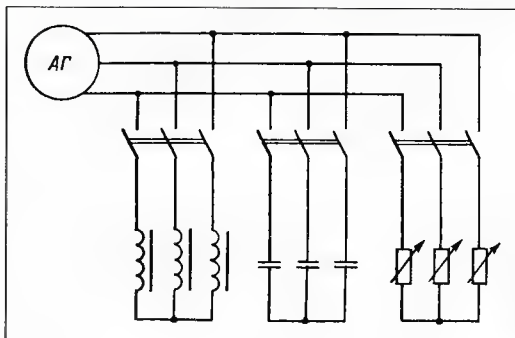


Рис. 18. Схема асинхронного генератора с феррорезонансным стабилизатором напряжения

Схема асинхронного генератора с двухступенчатым регулированием емкости шунтирующих конденсаторов приведена на рис. 17. Батарея конденсаторов с емкостью C_1 включена постоянно. Дополнительная батарея с емкостью C_2 включается при достижении определенной нагрузки. Управление дополнительной батареей конденсаторов может быть автоматизировано.

К недостаткам способа относятся:

- 1) ступенчатое регулирование напряжения, не удовлетворяющее требованию $U_1 = \text{const}$ при переменной нагрузке;
- 2) наличие коммутационной аппаратуры, усложняющей эксплуатацию генераторной установки.

Простым автоматически действующим бесконтактным устройством является феррорезонансный стабилизатор напряжения, представляющий собой реактор переменной индуктивности. В сочетании с батареей шунтирующих конденсаторов постоянной емкости он может обеспечить стабилизацию напряжения при изменении нагрузки в небольших пределах.

Автономная система генерирования трехфазного тока с асинхронным генератором, в которой используется *феррорезонансный стабилизатор напряжения*, приведена на рис. 18. Схема настраивается на резонанс токов при номинальном напряжении в режиме холостого хода. Магнитная система стабилизатора напряжения находится в состоянии насыщения.

Уменьшение напряжения на зажимах машины вызывает увеличение индуктивного сопротивления реактора вследствие уменьшения насыщения его сердечника. Ток реактора ограничивается, что приводит к соответствующему перераспределению реактивной мощности конденсаторов в системе. В этом и состоит идея применения феррорезонансного стабилизатора напряжения.

К недостаткам способа относятся:

- 1) незначительный диапазон регулирования;
- 2) наличие феррорезонансного стабилизатора напряжения, увеличивающего массу, габариты и стоимость генераторной установки.

Бесконтактные регулирующие устройства, состоящие из батареи шунтирующих конденсаторов постоянной емкости и управляемого реактора, позволяют осуществить стабилизацию напряжения на всем диапазоне изменения нагрузки.

Приведенная на рис. 19 схема асинхронного генератора с управляемым реактором является дальнейшим развитием схемы с феррорезонансным стабилизатором напряжения. В схеме параллельно конденсаторам включены обмотки переменного тока реактора. Для подмагничивания реактора используются две дифференциально включенные обмотки управления. Ток одной из них (намагничи-

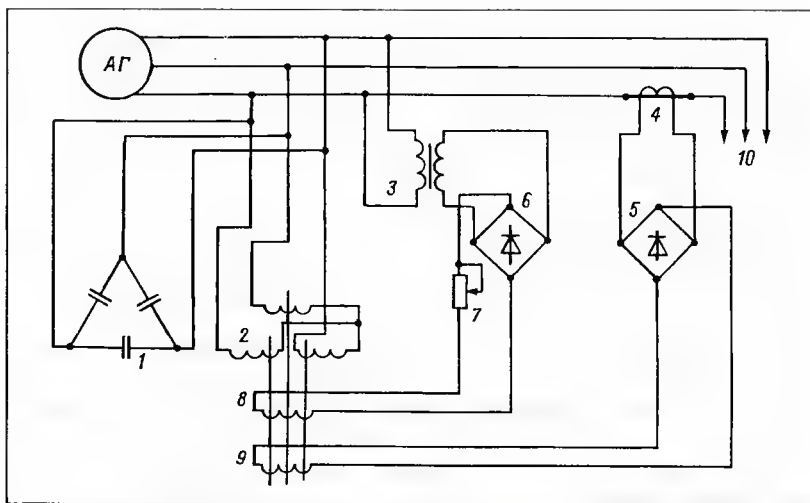


Рис. 19. Схема асинхронного генератора с управляемым реактором:

1 — статические конденсаторы; 2 — обмотки переменного тока реактора; 3 — трансформатор напряжения; 4 — трансформатор тока; 5, 6 — выпрямители; 7 — регулировочный реостат; 8, 9 — обмотки управления; 10 — нагрузка

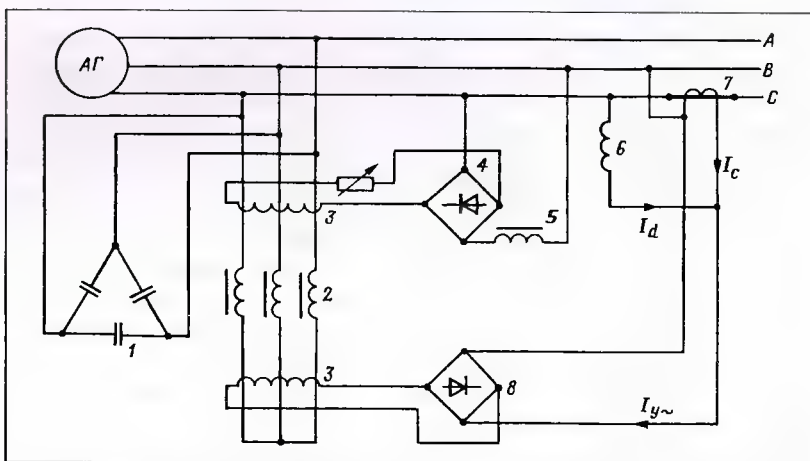


Рис. 20. Схема асинхронного генератора с управляемым реактором и фазочувствительным измерительным органом:

1 — статические конденсаторы; 2 — обмотки переменного тока реактора; 3 — обмотки управления; 4, 8 — выпрямители; 5 — нелинейный измерительный элемент; 6 — линейный реактор; 7 — трансформатор тока

вающей) пропорционален напряжению на зажимах машины, ток другой (размагничивающей) — току нагрузки.

При холостом ходе генератора сердечники реактора находятся в состоянии насыщения, поэтому по обмоткам переменного тока реактора протекает наибольший ток. Ток на выходе параллельного участка, образованного обмотками переменного тока реактора и конденсаторами, имеет емкостной характер, и его значение является достаточным для возбуждения генератора до напряжения, практически равного номинальному.

С появлением нагрузки насыщение сердечника реактора ограничивается и индуктивное сопротивление обмоток переменного тока возрастает. Ток на выходе параллельного участка при этом увеличивается. В результате напряжение генератора поддерживается постоянным.

При некоторой определенной нагрузке магнитодвижущие силы (МДС) обмоток управления уравниваются и по обмоткам переменного тока реактора протекает ток холостого хода. Ток на выходе параллельного участка (имеющий емкостной характер) достигает своего наибольшего значения.

Для обеспечения возможной кратковременной перегрузки значение тока нагрузки, при котором МДС обмоток управления уравниваются, принимается большим номинального. Необходимая емкость конденсаторов при этом соответственно увеличивается.

Рассмотренное устройство обеспечивает плавное, автоматически действующее регулирование эквивалентной емкости конденсаторов на всем заданном диапазоне изменения нагрузки. К его недостатку следует отнести то обстоятельство, что оно реагирует только на значение тока нагрузки, т.е. не является фазочувствительным.

Более совершенной является схема, приведенная на рис. 20. В ней, кроме элементов рассмотренной выше схемы, используются нелинейный измерительный элемент (насыщенный реактор с замкнутым магнитопроводом) и фазочувствительный измерительный орган.

Нелинейный измерительный элемент 5 включается в цепь намагничивающей обмотки управления. Он увеличивает чувствительность устройства к отклонениям напряжения на зажимах генератора от номинального. Если, например, напряжение несколько уменьшилось, то напряжение реактора 5 также уменьшится, а его индуктивное сопротивление возрастет. Ток управления намагничивающей обмотки ограничивается теперь по двум причинам: вследствие снижения напряжения и увеличения сопротивления цепи обмотки. Насыщение сердечников реактора 2 уменьшается в большей степени, чем без нелинейного элемента 5, что приводит к соответствующему возрастанию емкостного тока на выходе устройства.

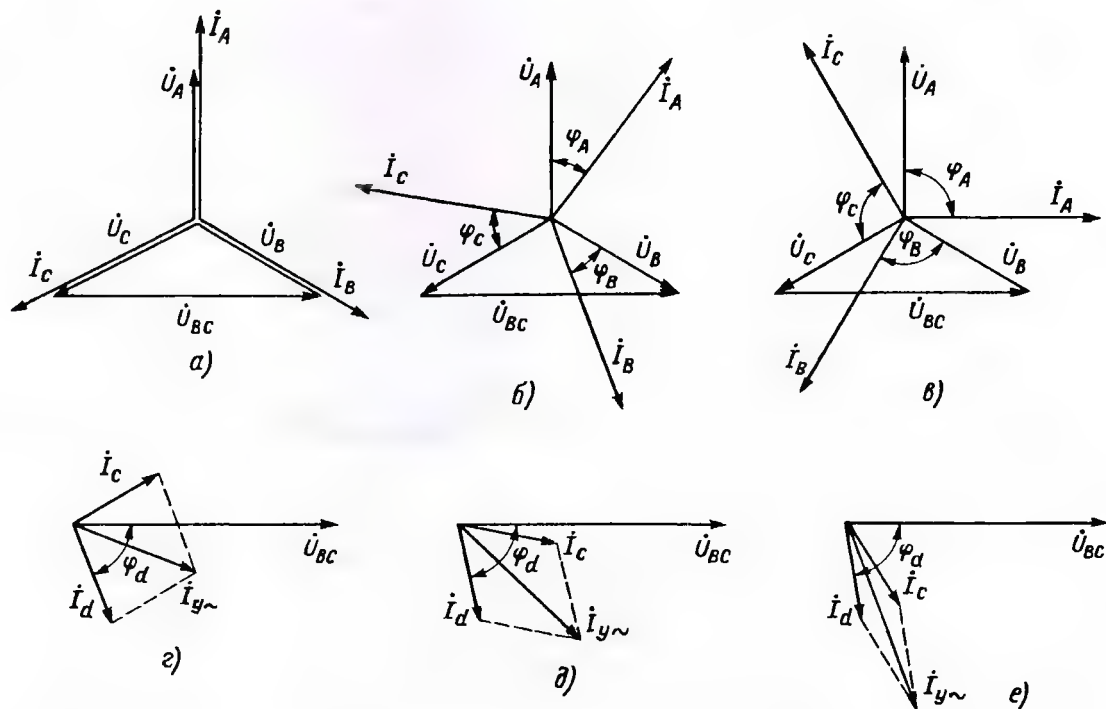


Рис. 21. Векторные диаграммы токов и напряжений, поясняющие принцип действия фазочувствительного органа: а, г — при активной нагрузке; б, д — при активно-индуктивной нагрузке; в, е — при индуктивной нагрузке

Таким же образом, с превышением напряжения над номинальным, увеличение тока управления намагничивающей обмотки вызывается не только увеличением напряжения, но и уменьшением сопротивления цепи обмотки вследствие насыщения реактора 5.

Фазочувствительный орган выполнен в виде сочетания линейного реактора 6 и трансформатора тока 7. Он реагирует на изменение значения и характера тока нагрузки. С изменением только значения тока нагрузки ($\varphi = \text{const}$) действие обеих схем (см. рис. 19 и 20) остается аналогичным.

Рассмотрим действие фазочувствительного органа при изменении угла сдвига фаз между током и напряжением нагрузки.

Положим, что действующие значения фазных токов и напряжений приемников остаются постоянными, т.е. выполняются условия:

$$I_A = I_B = I_C = \text{const};$$

$$U_A = U_B = U_C = \text{const};$$

$$\cos \varphi = \text{var},$$

где $I_A, I_B, I_C, U_A, U_B, U_C$ — токи и напряжения фаз; φ — угол сдвига между током и напряжением фазы.

Для тока на выходе фазочувствительного элемента справедливо выражение

$$I_{y\sim} = I_d + I_c,$$

где I_d — ток линейного реактора; I_c — ток вторичной обмотки трансформатора тока.

При принятых условиях $I_d = \text{const}, I_c = \text{const}$.

В случае активной нагрузки (рис. 21, а) векторная диаграмма токов фазочувствительного органа принимает вид, приведенный на рис. 21, г. Ток I_d отстает от напряжения U_{BC} по фазе на угол φ_d . Ток I_c находится в противофазе с током первичной обмотки трансформатора тока. Геометрическая сумма этих токов определяет ток на выходе фазочувствительного органа.

Изменение характера нагрузки вызывает изменение значения тока $I_{y\sim}$. На рис. 21, б приведена векторная диаграмма токов и напряжений при активно-индуктивной нагрузке с коэффициентом мощности $\cos \varphi = 0,8$, а на рис. 21, д — векторная диаграмма токов фазочувствительного органа. Как видно, с увеличением угла сдвига фаз

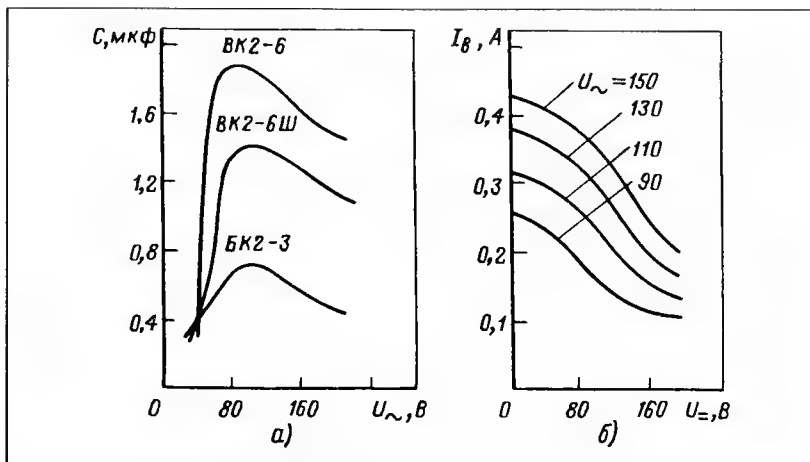


Рис. 22. Характеристики варикондов:

а — зависимости емкости конденсаторов от переменного напряжения при постоянной амплитуде переменного напряжения; *б* — зависимости тока конденсаторов от постоянного напряжения при постоянной амплитуде переменного напряжения

(при $\varphi > 0$) ток $I_{y\sim}$ возрастает и при чисто индуктивной нагрузке (рис. 21, *е*) достигает наибольшего значения.

Аналогичным образом можно показать, что при активно-емкостной нагрузке ($\varphi < 0$) ток $I_{y\sim}$ уменьшается.

Рассматриваемая схема отличается от предыдущей способностью реагировать на *изменение характера нагрузки* при более высокой чувствительности по напряжению.

Заметим, что общими недостатками схем асинхронного генератора с управляемыми реакторами являются значительная масса и относительно большие габариты реакторов.

Применение *сегнетокерамических нелинейных конденсаторов* (варикондов, т.е. конденсаторов переменной емкости) в целях стабилизации напряжения автономного асинхронного генератора основывается на их свойстве в широких пределах изменять диэлектрическую проницаемость в зависимости от напряженности приложенного к ним электрического поля.

Вариконды имеют небольшие массу и габариты. Они выдерживают различные механические нагрузки и могут быть использованы в устройствах, подверженных сотрясениям и вибрациям.

К недостатку варикондов относится зависимость их характеристик от температуры. Для устранения этого недостатка требуется создание

специальных материалов или применение параллельно соединенных варикондов с различными температурными характеристиками. Термостойкость образованного таким образом блока конденсаторов со специально подобранными элементами значительно повышается.

Зависимость емкости варикондов от переменного напряжения неоднозначна (рис. 22, а): емкость варикондов различных типов возрастает с увеличением напряжения примерно до 100 В и затем начинает уменьшаться. *Рабочей областью этих характеристик являются их ниспадающие ветви: они соответствуют возрастающей емкости при уменьшающемся напряжении.* Значительно больший эффект регулирования емкости варикондов дает воздействие на них постоянного напряжения (рис. 22, б).

При одновременном воздействии на конденсаторы переменным и постоянным (управляющим) напряжениями их емкость изменяется в 5 — 10 раз. Обе эти возможности могут быть использованы для стабилизации напряжения.

По исследованиям И. А. Попова для получения полной емкости, необходимой для возбуждения генератора до номинального напряжения при произвольной нагрузке, целесообразно использовать линейные конденсаторы емкостью C и вариконды емкостью C_B :

$$C_{\Phi} = C + C_B, \quad (50)$$

где C_{Φ} — емкость на фазу.

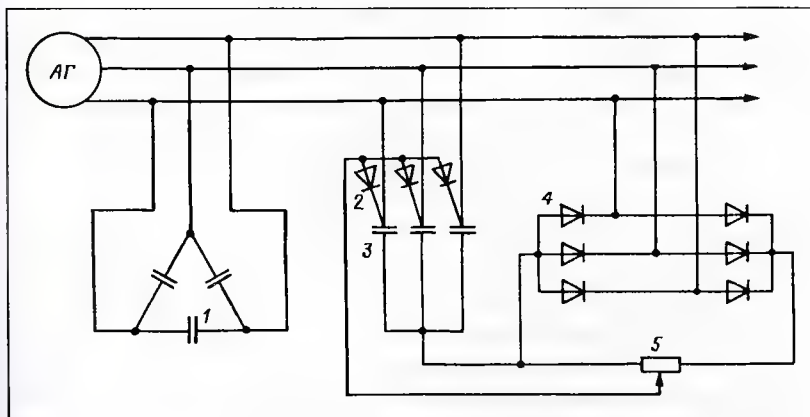


Рис. 23. Схема асинхронного генератора с шунтирующими линейными и нелинейными конденсаторами:

1 — линейные конденсаторы; 2 — диоды; 3 — нелинейные конденсаторы (вариконды); 4 — выпрямительный мост

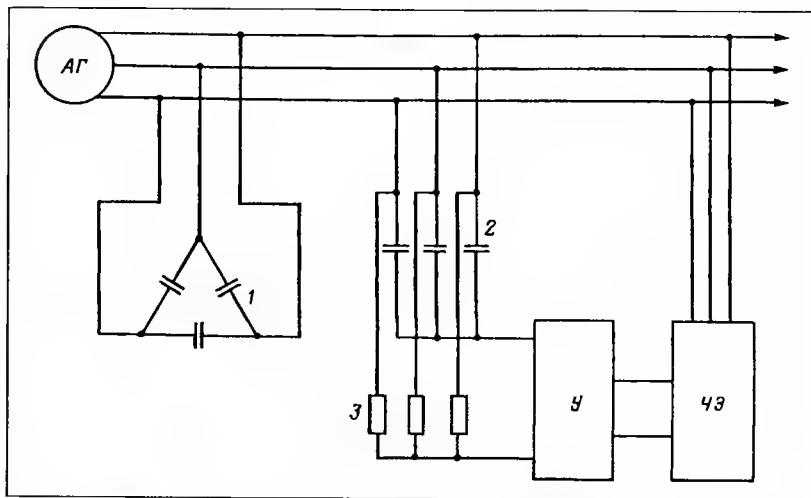


Рис. 24. Схема асинхронного генератора с использованием для регулирования емкости варикондов чувствительного и усилительного элементов:

1 — линейные конденсаторы; 2 — нелинейные конденсаторы (вариконды); 3 — резисторы; У — усилитель; ЧЭ — чувствительный элемент

Емкость линейных конденсаторов должна быть достаточной для возбуждения генератора на холостом ходу. Таким образом, регулируемая часть емкости набирается из варикондов.

Схема асинхронного генератора с шунтирующими линейными и нелинейными конденсаторами приведена на рис. 23. Для регулирования емкости нелинейных конденсаторов посредством воздействия на них постоянным напряжением в схеме используются трехфазный выпрямительный мост 4 и регулировочный реостат 5. Диоды 2 препятствуют прохождению переменного тока в цепь управления.

Действие схемы основывается на использовании ниспадающей ветви (см. рис. 22) характеристики $I_B = f(U_-)$. Уменьшение напряжения на выходе асинхронного генератора с возрастанием нагрузки вызывает (при данном фиксированном положении движка реостата 5) снижение постоянного (управляющего) напряжения, приложенного к нелинейным конденсаторам 3. Последнее обуславливает увеличение емкости варикондов и реактивного намагничивающего тока. В результате изменение напряжения генератора, при соответствующей настройке параметров схемы, компенсируется с большей или меньшей степенью точности.

Лучшими стабилизирующими свойствами обладает схема, приведенная на рис. 24. По принципу действия она аналогична схеме, рассмотренной выше. Однако роль регулировочного реостата и выпрямителя в ней играют чувствительный элемент ЧЭ и усилитель У. Первый воспринимает отклонения напряжения от номинального и передает соответствующий сигнал второму. После усиления и выпрямления управляющий сигнал подается на вариконды 2.

Схемы асинхронного генератора с использованием в них варикондов обеспечивают стабилизацию напряжения на всем диапазоне изменения нагрузки от нуля до номинальной при минимальных массовых показателях регулирующих устройств.

Компаундирование возбуждения асинхронного генератора. Компаундированием возбуждения асинхронного генератора преследуется цель автоматической стабилизации напряжения на зажимах приемника при данном характере нагрузки и изменении ее в определенных пределах. Емкости шунтирующих и компаундирующих конденсаторов (рис. 25) не изменяются ($C = \text{const}$; $C_k = \text{const}$).

Напряжения генератора U_1 , компаундирующих конденсаторов U_k и нагрузки U связаны между собой зависимостью

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_k + \dot{U}. \quad (51)$$

Изменение нагрузки при условии $U = \text{const}$ сопровождается изменением напряжения на зажимах генератора, что является характер-

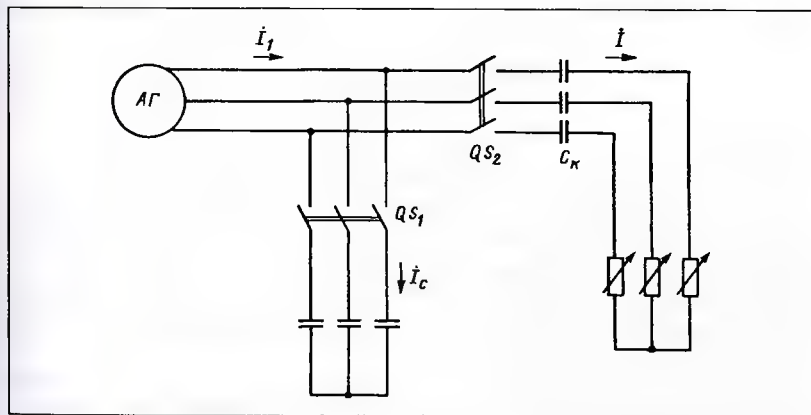


Рис. 25. Схема включения асинхронного генератора с компаундированием возбуждения

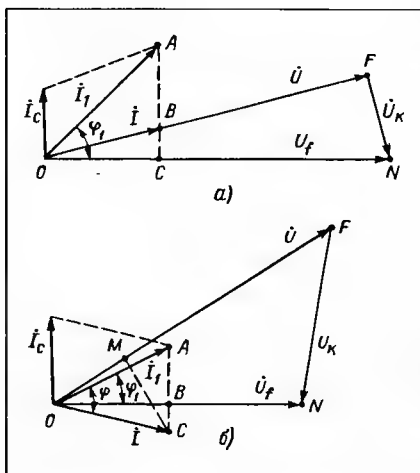


Рис. 26. Векторные диаграммы асинхронного генератора с компаундированием возбуждения:

а — при активной нагрузке; б — при активно-индуктивной нагрузке

ной особенностью схемы с компаундированием возбуждения. Напряжение U_k также не остается постоянным, что непосредственно следует из (51). Благодаря этому и становится возможной стабилизация напряжения на зажимах нагрузки.

С уменьшением нагрузки напряжение компаундирующих конденсаторов также уменьшается. Тем самым их реактивная мощность автоматически ограничивается. Для предупреждения срыва возбуждения при слабых нагрузках в схеме используются шунтирующие конденсаторы. За счет их емкости создается необходимое начальное насыщение магнитной цепи генератора.

Реактивная мощность компаундирующих конденсаторов зависит от значения и характера нагрузки. При заданном значении нагрузки она тем больше, чем ниже коэффициент мощности приемника. По проведенным исследованиям реактивная мощность компаундирующих конденсаторов

$$Q_k = m_1 I^2 \frac{1}{\omega_1 C_k} \quad (52)$$

может составлять 30 — 50 % мощности, развиваемой генератором.

Вследствие возможного снижения начального насыщения мощность шунтирующих конденсаторов принимается примерно равной 50 — 60 % мощности генератора.

При анализе распределения реактивных мощностей в системе (рис. 25) удобно пользоваться векторными диаграммами токов и напряжений статорных цепей.

Если генератор включен на активную нагрузку, то его реактивная мощность компенсируется суммой реактивных мощностей шунтирующих и компаундирующих конденсаторов. Из диаграммы рис. 26, а видно, что реактивная мощность фазы генератора

$$U_1 I_1 \sin \varphi_1 = m_u ON \cdot m_i (AB + BC),$$

где m_u, m_i — масштабы напряжения и тока.

Реактивная мощность фазы шунтирующих и компаундирующих конденсаторов:

$$U_1 I_C = m_u ON \cdot m_i AB;$$

$$U_K I = m_u FN \cdot m_i OB.$$

Представим последнее выражение в виде

$$U_K I = U_1 (I_1 \sin \varphi_1 - I_C) = m_u ON \cdot m_i BC.$$

Реактивная мощность генератора:

$$Q_1 = Q_C + Q_K,$$

причем

$$Q_C = Q_K \frac{AB}{BC}.$$

Из диаграммы для активно-индуктивной нагрузки (рис. 26, б) находим, что реактивные мощности фазы генератора и нагрузки составляют:

$$U_1 I_1 \sin \varphi_1 = m_u ON \cdot m_i AB;$$

$$UI \sin \varphi = m_u OF \cdot m_i MC.$$

Реактивные мощности фазы шунтирующих и компаундирующих конденсаторов:

$$U_1 I_C = m_u ON m_i AC;$$

$$U_K I = m_u FN m_i OC.$$

Произведя вычисления, получим

$$Q_1 + Q = Q_C + Q_K,$$

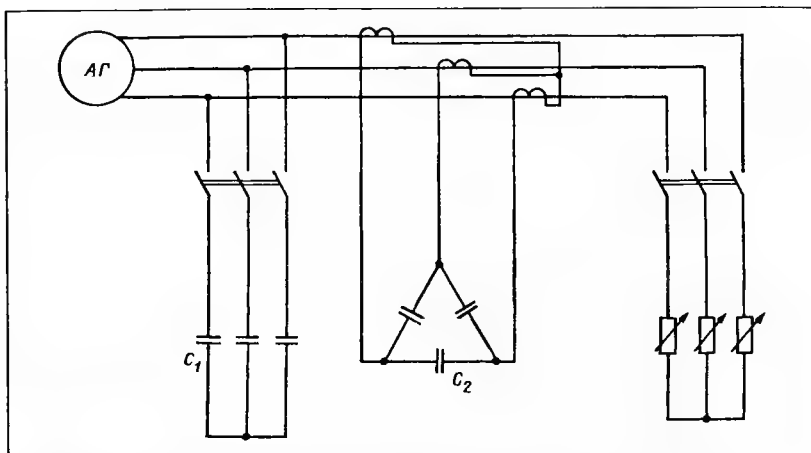


Рис. 27. Схема асинхронного генератора с включением компаундирующих конденсаторов во вторичную цепь трансформаторов тока

т.е. реактивные мощности генератора и нагрузки компенсируются реактивной мощностью шунтирующих и компаундирующих конденсаторов.

Отношение мощностей конденсаторов в данном случае

$$\frac{Q_C}{Q_k} = \frac{ON \cdot AC}{FN \cdot OC} = 1.$$

При применении компаундирования возбуждения возникает задача определения компаундирующей емкости по известным току и коэффициенту мощности нагрузки. Решение ее основывается на использовании графоаналитических методов.

Применение способа стабилизации напряжения компаундированием возбуждения ограничивается из-за пониженных массовых показателей (0,5 – 0,7 кг/квар при частоте 400 Гц) компаундирующих конденсаторов. Другое затруднение связано с возникновением перенапряжений на конденсаторах при перегрузках и коротких замыканиях.

Уменьшение емкости компаундирующих конденсаторов может быть достигнуто при включении их во вторичную цепь трансформаторов тока (рис. 27).

8. Энергетические показатели генераторных установок

Основными показателями автономных электроэнергетических установок являются:

- коэффициент полезного действия генератора;
- коэффициент мощности генератора;
- относительная масса статических конденсаторов.

В процессе преобразования механической энергии в электрическую возникают потери, снижающие КПД генератора. По природе образования они разделяются на электрические, магнитные (в стали сердечника статора), механические и добавочные.

Электрические потери в обмотках статора и ротора соответственно равны:

$$\Delta P_{\text{эл}} = m_1 I_1^2 r_1; \quad (53)$$

$$\Delta P_{\text{эл}2} = m_1 I_2'^2 r_2'. \quad (54)$$

Магнитные потери вызываются явлением гистерезиса и вихревыми токами в сердечнике статора:

$$\Delta P_{\text{ст}} = m_1 I_0^2 r_m. \quad (55)$$

Механические потери $\Delta P_{\text{мх}}$ представляют собой часть механической мощности, расходуемой на трение в подшипниках и на вентиляцию. В диапазоне мощностей 1 – 5 кВт они составляют 5 – 10 % общих потерь [10].

Добавочные потери $\Delta P_{\text{д}}$ обусловлены высшими гармониками МДС и зубчатым строением статора и ротора. Расчет и экспериментальные исследования добавочных потерь вызывают значительные затруднения, поэтому в соответствии с ГОСТ 11828-75 они принимаются равными 0,5 % потребляемой мощности.

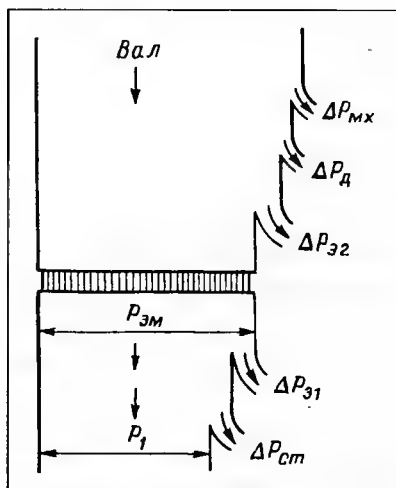


Рис. 28. Энергетическая диаграмма асинхронного генератора

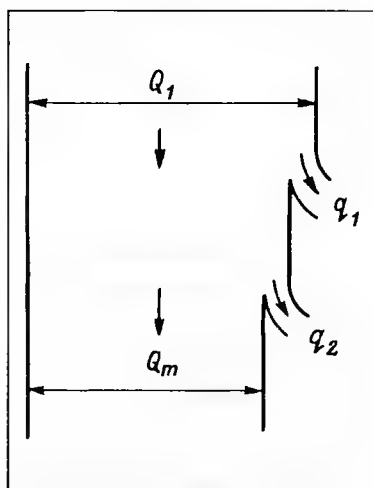


Рис. 29. Диаграмма реактивных мощностей асинхронной машины

Энергетическая диаграмма асинхронного генератора, соответствующая схеме замещения (см. рис. 7, а), приведена на рис. 28. Из ее рассмотрения следует, что если пренебречь механическими и добавочными потерями как несущественными, то КПД генератора может быть определен по соотношению

$$\eta = \frac{P_1}{P_2'} = \frac{P_2' - \Sigma \Delta P}{P_2'}$$

или

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma \Delta P}{P_2'} \quad (56)$$

где

$$\Sigma \Delta P = \Delta P_{31} + \Delta P_{э2} + \Delta P_{ст} \quad (57)$$

Реактивная намагничивающая мощность, как было показано выше, потребляется асинхронной машиной в любом режиме ее работы, поэтому диаграмма преобразования реактивной мощности двигателя и генератора принимает один и тот же вид (рис. 29).

Обозначения на диаграмме:

Q_1 — реактивная мощность асинхронной машины;

Q_m — реактивная мощность, необходимая для создания основного магнитного поля машины;

q_1 — реактивная мощность рассеяния обмотки статора;

q_2 — то же, обмотки ротора,
причем

$$Q_1 = m_1 U_1 I_1 \sin \varphi_1, \quad (58)$$

или

$$Q_1 = Q_m + q_1 + q_2, \quad (59)$$

где

$$Q_m = m_1 I_0^2 x_m; \quad (60)$$

$$q_1 = m q I_1^2 x_1; \quad (61)$$

$$q_2 = m_1 I_2'^2 x_2'. \quad (62)$$

Полная или кажущаяся мощность генератора равна

$$S_1 = \sqrt{P_2'^2 + Q_1^2}. \quad (63)$$

Коэффициент мощности составит

$$\cos \varphi_1 = P_2' / S_1. \quad (64)$$

Из этого выражения видно, что коэффициент мощности асинхронного генератора никогда не может достичь значения, равного единице.

Пример 1. Рассмотрим пример определения энергетических показателей асинхронного самовозбуждающегося генератора постоянной частоты, работающего в номинальном режиме. В качестве генератора используется трехфазный асинхронный двигатель АИР71В2 мощностью 1,1 кВт, на напряжение 220/380 В; $I_{\text{ном}} = 2,52$ А; частота вращения 2835 мин^{-1} , $\cos \varphi = 0,84$; КПД = 0,79.

Заданными величинами являются:

1) мощность нагрузки $P_1 = 1,1$ кВт;

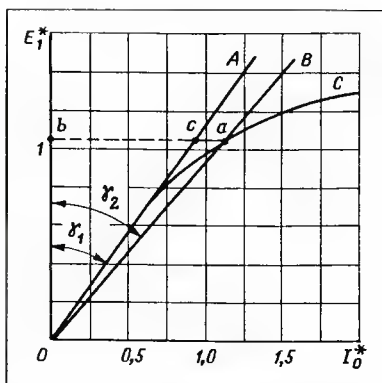


Рис. 30. Кривая намагничивания электрической машины (OC) и вольт-амперные характеристики конденсаторов (OA, OB)

Точка a , соответствующая номинальному режиму, выбирается на криволинейном участке характеристики. Степень насыщения магнитной системы характеризуется коэффициентом насыщения $k_{\text{нас}}$, равным отношению отрезка ab к отрезку bc . Для машин переменного тока $k_{\text{нас}} = 1,1 \div 1,3$ [3].

При среднем значении $k_{\text{нас}} = 1,2$ прямая OB , проведенная из начала координат, образует с осью ординат угол γ_2 , тангенс которого в 1,2 раза больше тангенса угла γ_1 , образованного прямой OA с той же осью. Пересечение прямой OB с кривой намагничивания и определяет положение искомой точки a .

Как видно, отношение ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению

$$k_E = E_1 / U_1 = E_1^* / 1 = 1,02,$$

откуда

$$E_1 = E_1^* U_1 = 1,02 \cdot 220 = 224,4 \text{ В.}$$

2. Расчетная мощность [см. (9)]:

$$S_1 = P_1 \frac{k_E}{\eta_1 \cos \varphi_1}, \quad (65)$$

где P_1 — мощность нагрузки.

2) коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi = 0,8$;

3) напряжение фазы статора $U_1 = 220 \text{ В}$;

4) параметры схемы замещения, Ом:

$$r_1 = 6,9; \quad r_2' = 5,35; \quad x_1 = 4,7; \\ x_2' = 7,6; \quad x_m = 160; \quad r_m = 17,4;$$

5) число полюсов $2p = 2$.

Последовательность расчета

1. Электродвижущая сила фазы генератора.

Для определения ЭДС фазы генератора можно использовать кривую намагничивания электрической машины (рис. 30).

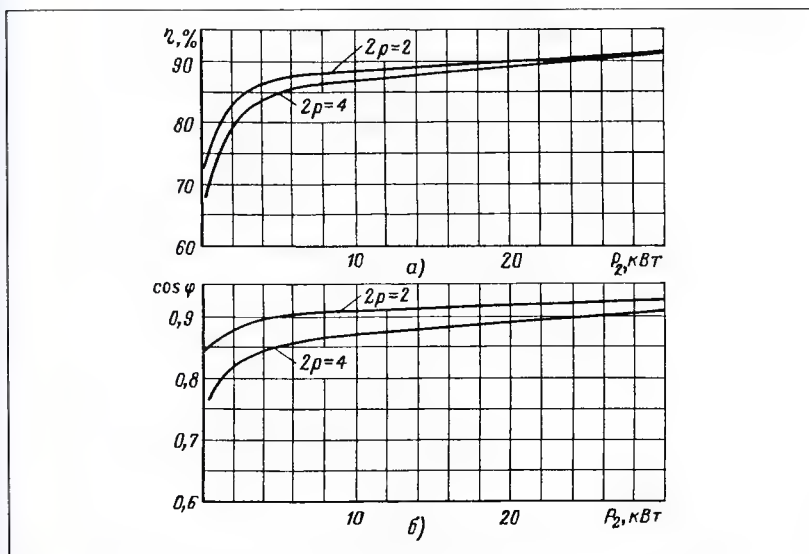


Рис. 31. Зависимости КПД и $\cos \varphi$ асинхронных двигателей от полезной мощности и числа полюсов

Энергетические коэффициенты ($\cos \varphi_1$, η_1) асинхронных двигателей в зависимости от числа полюсов и полезной мощности выбираются по кривым, приведенным на рис. 31 [см. (9)]. Так, при $P_2 = 1$ кВт и $2p = 2$ $\cos \varphi_1 = 0,87$; $\eta_1 = 0,77$. В отличие от двигателей асинхронные генераторы вследствие неравенства $E_1 > U_1$ потребляют большую реактивную мощность и имеют практически одинаковые или несколько большие значения КПД.

Принимаем $\cos \varphi_1 = 0,8$; $\eta_1 = 0,79$.

Расчетная мощность составит:

$$S_1 = 1100 \frac{1,02}{0,8 \cdot 0,79} = 1775 \approx 1800 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

3. Активная мощность на входе генератора:

$$P'_2 = S_1 \cos \varphi_1, \quad (66)$$

$$P'_2 = 1800 \cdot 0,8 = 1440 \text{ Вт}.$$

4. Ток обмотки статора:

$$I_1 = \frac{P_1}{3U_1 \cos \varphi_1 \eta}, \quad (67)$$

или

$$I_1 = \frac{1100}{3 \cdot 220 \cdot 0,8 \cdot 0,79} = 2,63 \text{ А.}$$

5. Ток холостого хода (без учета потерь в стали):

$$I_0 = \frac{E_1}{x_m}, \quad (68)$$

или

$$I_0 = \frac{224,4}{160} = 1,4 \text{ А.}$$

6. Потери.

Сумма потерь:

$$\Sigma \Delta P = P'_2 - P_1; \quad (69)$$

$$\Sigma \Delta P = 1440 - 1100 = 340 \text{ Вт.}$$

Из них: электрические потери в обмотке статора по уравнению (53):

$$\Delta P_{\Sigma 1} = 3 \cdot 2,63^2 \cdot 6,9 = 143 \text{ Вт;}$$

потери в стали по выражению (29):

$$\Delta P_{\text{ст}} = 3 \cdot 1,4^2 \cdot 17,4 = 102 \text{ Вт;}$$

механические потери:

$$\Delta P_{\text{мх}} \approx 0,067 \Sigma \Delta P = 23 \text{ Вт;}$$

добавочные потери:

$$\Delta P_{\text{д}} = 0,005 P'_2 = 0,005 \cdot 1440 \approx 7 \text{ Вт.}$$

Электрические потери в роторе:

$$\Delta P_{\Sigma 2} = \Sigma \Delta P - (\Delta P_{\Sigma 1} + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{мх}} + \Delta P_{\text{д}});$$

$$\Delta P_{\Sigma 2} = 340 - (143 + 102 + 23 + 7) = 65 \text{ Вт.}$$

7. Электромагнитная мощность.

Как следует из энергетической диаграммы генератора (см. рис. 28):

$$P_{\Sigma \text{м}} = P_1 + \Delta P_{\Sigma 1} + \Delta P_{\text{ст}}, \quad (70)$$

откуда

$$P_{\Sigma \text{м}} = 1100 + 143 + 102 = 1345 \text{ Вт.}$$

8. Скольжение при номинальной нагрузке:

$$s = \frac{\Delta P_{\Sigma 2}}{P_{\Sigma \text{м}}}, \quad (71)$$

откуда

$$s = \frac{65}{1345} = 0,048.$$

9. Приведенный ток ротора (10):

$$I'_2 = \sqrt{\frac{P_{\Sigma \text{м}} s}{m_1 r_2}}, \quad (72)$$

после подстановки соответствующих значений получим

$$I'_2 = \sqrt{\frac{1345 \cdot 0,048}{3 \cdot 5,35}} = 2 \text{ А.}$$

10. Треугольник токов.

Уравнение токов (7) изящно решается графическим путем. При допущении $r_m = 0$ вектор тока холостого хода $\dot{I}_0$ совпадает с положительным направлением оси абсцисс, а вектор ЭДС $\dot{E}_1$ — с отрицательным направлением оси ординат (рис. 32, а). Положение на комплексной плоскости векторов $\dot{I}_1$ и $\dot{I}'_2$ устанавливается путем засечек.

11. Напряжение генератора.

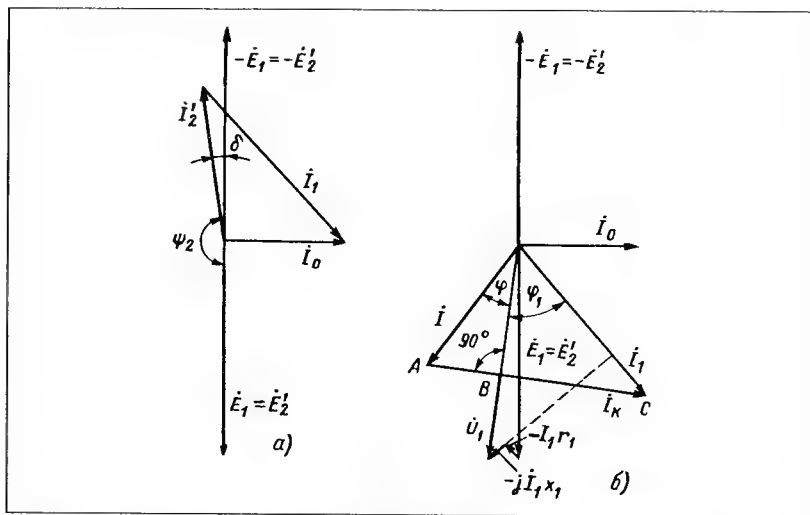


Рис. 32. Графическое решение уравнения токов (а) и напряжений (б) асинхронного генератора

Графоаналитическое решение первого уравнения системы (7) позволяет определить напряжение генератора по величине и направлению, как показано на рис. 32, б. В результате решения получаем

$$\overline{224,4} - \overline{2,63 \cdot 6,9} - j\overline{2,63 \cdot 4,7} = \overline{220} \text{ В.}$$

12. Реактивная мощность генератора.

Составляющие реактивной мощности генератора находят по соотношениям (60) – (62):

$$Q_m = 3 \cdot 1,4^2 \cdot 160 = 940 \text{ вар;}$$

$$q_1 = 3 \cdot 2,63^2 \cdot 4,7 = 97 \text{ вар;}$$

$$q_2 = 3 \cdot 2^2 \cdot 7,6 = 91 \text{ вар.}$$

В соответствии с уравнением (59) $Q_1 \approx 1128 \text{ вар.}$

Полученный результат близок к действительному значению реактивной мощности генератора:

$$Q_1 = S_1 \sin \varphi_1 = 1800 \cdot 0,6 = 1080 \text{ вар.}$$

13. Реактивная мощность нагрузки:

$$Q = P \operatorname{tg} \varphi; \quad (73)$$

$$Q = 1100 \cdot 0,75 = 825 \text{ вар.}$$

14. Реактивная мощность батареи конденсаторов:

$$Q_6 = Q_1 + Q = 1080 + 825 = 1905 \text{ вар.}$$

15. Ток фазы конденсаторов:

$$I_{\kappa} = \frac{Q_6}{m_1 U_1}; \quad (74)$$

$$I_{\kappa} = \frac{1905}{3 \cdot 220} = 2,88 \text{ A.}$$

Иначе ток фазы конденсаторов можно определить по формуле (14) при $\varphi > 0$:

$$I_{\kappa} = I_1 \sin \varphi_1 + I \sin \varphi,$$

где

$$I = \frac{P}{3 U_1 \cos \varphi_1} = \frac{1100}{3 \cdot 220 \cdot 0,8} = 2,08 \text{ A.}$$

Таким образом,

$$I_{\kappa} = 2,63 \cdot 0,6 + 2,08 \cdot 0,6 = 2,85 \text{ A.}$$

16. Частота вращения ротора.

По условию постоянства частоты генерируемых колебаний частота вращения ротора при номинальной нагрузке:

$$n_2 = 3000(1 - 0,048) = 3144 \text{ мин}^{-1}.$$

17. Частота напряжения генератора по (26):

$$f_1 = 3144 / [60(1 - 0,048)] = 50 \text{ Гц.}$$

18. Емкость батареи конденсаторов:

$$C_6 = \frac{3I_k \cdot 10^6}{\omega_l U_l}; \quad (75)$$

$$C_6 = \frac{3 \cdot 2,85 \cdot 10^6}{314 \cdot 220} = 123,76 \text{ мкФ}.$$

Принимаем $C_6 = 126 \text{ мкФ}$.

19. Выбор типа конденсаторов.

В цепи асинхронного генератора возможно использование конденсаторов различных типов — МБГЧ, БГТ, К78-17 и др. Технические данные на них приведены в приложении (табл. П1 — П5).

Электрические свойства конденсаторов в значительной степени зависят от рода диэлектрика, заключенного между обкладками. По этому признаку различают воздушные конденсаторы, бумажные, слюдяные, масляные, электролитические и т.п. Каждый конденсатор рассчитан на определенное рабочее (номинальное) напряжение. Рабочим называется напряжение, при котором конденсатор может работать длительно. Номинальное напряжение и емкость указываются в паспортных данных конденсаторов.

Конденсаторы типа МБГЧ — металобумажные (из металлизированной бумаги) герметизированные частотные предназначены для работы в цепях переменного или пульсирующего тока в интервале температур от -60 до $+70$ °С, выполняются в корпусах прямоугольной формы и имеют постоянную емкость. По отклонению емкости от номинальной они изготавливаются II и III классов точности.

Конденсаторы типа БГТ — бумажные герметические термостойкие, постоянной емкости предназначены для работы в цепях постоянного, переменного и пульсирующего токов в интервале температур от -60 до $+100$ °С. По отклонению емкости от номинальной они изготавливаются трех классов точности:

Класс точности.....	I	II	III
Допустимое отклонение от номинального, %	± 5	± 10	± 20

Конденсаторы типа К78-17 — полипропиленовые пленочные металлизированные предназначены для работы в цепях переменного и пульсирующего токов с частотой 50 Гц. По допустимому отклонению емкости от номинальной они выпускаются II и III классов точности. Интервал рабочих температур от -25 до $+85$ °С.

Конденсаторы К78-17 изготавливаются в цилиндрических корпусах. По сравнению с рассмотренными выше они имеют улучшенные массогабаритные показатели.

При выборе типа конденсаторов учитываются класс точности, интервал рабочих температур, массогабаритные показатели и стоимость.

20. Расчет массогабаритных показателей конденсаторов.

В рассмотренном примере емкость фазы, равную 42 мкФ, можно составить из конденсаторов типа МБГЧ с высотой корпуса 50 мм и номинальным напряжением 250 В (см. табл. П1):

- 1) конденсаторы емкостью по 10 мкФ — 4 шт.;
- 2) конденсаторы емкостью 2 мкФ — 1 шт.;
- 3) масса конденсаторов одной фазы: $\begin{matrix} 4 \times 270 = 1080 \text{ г;} \\ + 1 \times 90 = 90 \text{ г;} \end{matrix}$
- 4) масса трехфазной батареи конденсаторов $G_k = 1,17 \times 3 = 3,51 \text{ кг}$;
- 5) относительная масса конденсаторов МБГЧ:

$$g_k = \frac{G_k}{Q_6} = \frac{3,51}{1,9} = 1,84 \text{ кг/квар.}$$

Ту же емкость фазы (42 мкФ) можно составить из конденсаторов типа К78-17 (см. табл. П5) с номинальным напряжением 250 В, диаметром корпуса D и высотой H , мм:

- 1) конденсаторы емкостью по 10 мкФ, $D \times H = 32 \times 57$ — 4 шт.;
- 2) конденсаторы емкостью 2 мкФ, $D \times H = 28 \times 57$ — 1 шт.;
- 3) масса конденсаторов одной фазы: $\begin{matrix} 4 \times 80 = 320 \text{ г;} \\ + 1 \times 50 = 50 \text{ г;} \end{matrix}$
- 4) масса трехфазной батареи конденсаторов $G_k = 0,37 \times 3 = 1,11 \text{ кг}$;
- 5) относительная масса конденсаторов К78-17:

$$g_k = \frac{G_k}{Q_6} = \frac{1,11}{1,9} = 0,58 \text{ кг/квар.}$$

Пример 2. Найдем емкость батареи конденсаторов по данным предыдущего примера, если частота напряжения генератора составляет 200 Гц.

Согласно (75) имеем:

$$C_6 = \frac{3I_k \cdot 10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 200 \cdot 220} = 30,94 \text{ мкФ,}$$

т.е. емкость батареи конденсаторов уменьшилась во столько же раз, во сколько увеличилась частота генерируемых колебаний.

9. Асинхронный вентильный генератор постоянного тока с конденсаторным возбуждением

К одной из разновидностей асинхронных генераторов с конденсаторным возбуждением относится асинхронный вентильный генератор постоянного тока (рис. 33, *а*).

Выпрямитель трехфазного тока включен по мостовой схеме А. Н. Ларионова. Диоды моста образуют катодную (1, 3, 5) и анодную (2, 4, 6) вентильные группы. Каждая из них проводит ток в течение 1/3 периода и 2/3 периода находится под воздействием обратного линейного напряжения.

Для трехфазной мостовой схемы характерно чередование трех- и двухвентильного режимов. Порядок чередования диодов легко устанавливается с помощью волновой диаграммы фазных напряжений (рис. 33, *б*), мгновенные значения которых равны:

$$u_A = U_m \cos \omega_1 t;$$

$$u_B = U_m \cos(\omega_1 t - 2\pi/3);$$

$$u_C = U_m \cos(\omega_1 t + 2\pi/3).$$

Как видно, число тактов схемы выпрямления $a = 6$, или $a = 2m$, где m — число фаз.

В трехвентильном режиме коммутируют два диода одной вентильной группы. По окончании коммутации ток проводят два диода — мгновенные значения напряжений соединенных с ними фаз становятся наибольшими по абсолютному значению.

При холостом ходе угол коммутации $\gamma = 0$ и кривая $U_{d0} = f(\omega_1 t)$ изображается огибающей кривых линейных напряжений (рис. 33, *в*). С появлением нагрузки переключение диодов происходит в течение некоторого времени — периода коммутации.

Моменты коммутации диодов и соответствующие им векторные диаграммы фазных напряжений показаны на рис. 34.

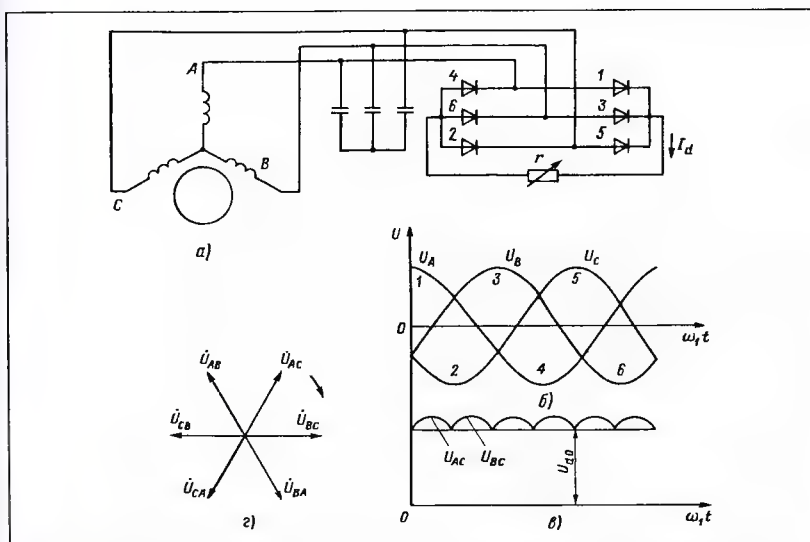


Рис. 33. Асинхронный вентильный генератор с конденсаторным возбуждением (АВГ):

a — принципиальная схема; *б* — кривые фазных напряжений; *в* — огибающие кривых линейных напряжений; *г* — векторная диаграмма порядка следования положительных значений линейных напряжений

В любой момент периода коммутации выполняется равенство

$$i_s + i_k = I_d,$$

где s принимает значения $1, 2, 3, \dots, 2, 1$ при $k = s + 2$.

Токи i_s, i_k изменяются противоположно: первый уменьшается, второй возрастает. Если при принятых обозначениях $s = 1$, то $k = 3$, т.е. коммутируют диоды катодной группы 1 и 3 и, соответственно, фазы источника A и B .

По окончании коммутации наступает двухвентильный режим с контуром $B - 3 - r - 2 - C - B$, затем будут коммутировать диоды 2 и 4 анодной группы и т.д.

Бесколлекторное преобразование переменного тока в постоянный с помощью полупроводниковых выпрямителей оказалось более рациональным по сравнению с использованием генераторов постоянного тока, к существенным недостаткам которых относятся большая масса и наличие щеточно-коллекторного узла.

Исследованиями установлены следующие основные свойства асинхронных вентильных генераторов с конденсаторным возбуждением:

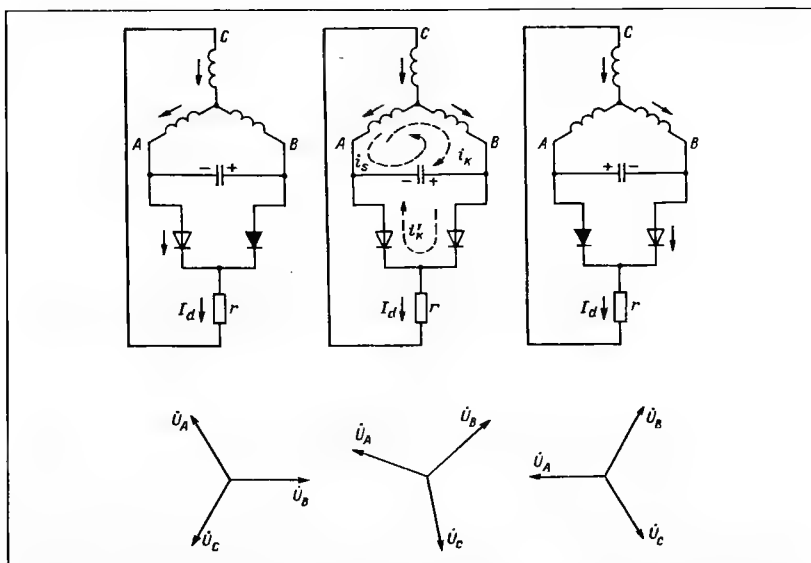


Рис. 34. Моменты коммутации вентилей и соответствующие им векторные диаграммы фазных напряжений

1) форма кривой напряжения генератора остается практически синусоидальной даже при значительных нагрузках;

2) конденсаторы, включенные в цепь обмотки статора, не только создают реактивную намагничивающую мощность, необходимую для образования магнитного поля машины, но и существенно улучшают процесс переключения вентилей, т.е. являются коммутирующими (последнее объясняется тем, что на их обкладках создается такая полярность, которая необходима для очередной коммутации вентилей);

3) уменьшение по сравнению с синхронным генератором пульсаций выпрямленного напряжения; заметим, что ухудшение энергетических показателей синхронного генератора, как вентильного, обусловлено характером реакции якоря; режим периодически повторяющихся двухфазных коротких замыканий, следующих одно за другим с частотой $6f_1$, аналогичен режиму работы генератора на несимметричную нагрузку (при этом форма кривой напряжения генератора искажается, что затрудняет решение проблемы сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения);

4) лучшие массовые показатели по сравнению с трансформаторно-выпрямительными блоками и синхронными генераторами.

10. Асинхронные генераторы с вентильным возбуждением (АГВВ)

Большой вклад в развитие теории вентильного возбуждения и разработку систем генерирования электрической энергии с использованием АГВВ внесли отечественные ученые М. Л. Костырев и А. И. Скороспешкин [7]. Они указали на перспективность применения этих машин для получения постоянного или переменного тока стабильной частоты в широком диапазоне мощностей, а также для осуществления стартерных режимов (запуск двигателей постоянного тока).

Основными элементами АГВВ являются асинхронная машина, вентильный преобразователь (ВП), состоящий из управляемых полупроводниковых приборов (тириستоров или транзисторов) и диодов, и система управления.

Типичная схема АГВВ постоянного тока приведена на рис. 35. Из сопоставления ее с изображенной на рис. 33, *а* видно, что выпрямительный мост трехфазного тока дополнен управляемыми вентилями — тиристорами $V S_1 - V S_6$, соединенными с диодами $V D_1 - V D_6$ встречно-параллельно.

Рассмотрим принцип действия ВП. Примем, что мгновенные значения фазных напряжений генератора изменяются, как показано на рис. 33, *б*. В результате переключения диодов $V D_1 - V D_6$ на выходе ВП устанавливается постоянное (выпрямленное) напряжение U_d .

На управляющие электроды тириستоров в определенной последовательности поступают импульсы управляющего тока, вызывающие необходимые коммутации приборов.

В течение каждого интервала времени, составляющего $1/6$ часть периода напряжения генератора, две фазы образуют контур, замкнутый через вентили, а третья фаза замыкается через сопротивление нагрузки. Так, по волновой диаграмме фазных напряжений и схем на рис. 35 нетрудно установить, что на интервале $0 - 60^\circ$ коммутируют фазы *А* и *С*, а коммутируемый ток протекает по контуру $A - V D_1 - V S_5 - C$ в направлении от фазы *А* к фазе *С*. Эти фазы оказываются

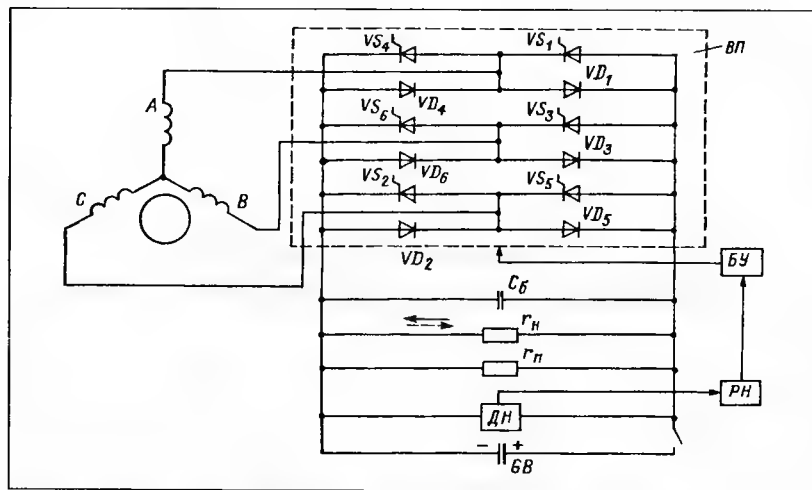


Рис. 35. Асинхронный вентильный генератор постоянного тока:

ВП — вентильный преобразователь; ДН — датчик напряжения; РН — регулятор напряжения; БУ — блок управления; $C_б$ — буферный конденсатор; $r_н$ — сопротивление нагрузки; $r_п$ — фиктивный резистор, потери в котором равны потерям в стали

включенными согласно, причем диод VD_1 и тиристор VS_5 находятся в проводящем состоянии. Таким образом происходит процесс передачи электрической энергии, запасенной в одной фазе, в цепь другой фазы.

Некоммутирующая фаза B на интервале $0 - 30^\circ$ входит в контур $A - VD_1 - r_н - VD_6 - B$. По сопротивлению нагрузки $r_н$ ток i_B протекает в направлении, обозначенном на схеме сплошной стрелкой.

На интервале $30 - 60^\circ$ образуется контур $B - VS_6 - r_н - VS_5 - C$. Ток фазы i_B меняет свой знак на обратный. Его направление по цепи постоянного тока обозначено на схеме рис. 35 пунктирной стрелкой.

На интервале $60 - 120^\circ$ процессы преобразования энергии по фазам АГВВ повторяются, но коммутирующими становятся фазы B и C . Затем будут коммутировать фазы B и A и т.д. Порядок чередования коммутирующих фаз за период нетрудно установить по волновой диаграмме фазных напряжений (см. рис. 33, б).

Каждая фаза в течение $2/3$ периода T коммутирует, находясь в режиме или потребления электромагнитной энергии $[(1/3)T]$, или ее генерирования $[(1/3)T]$. Остальную часть времени периода цепь фазы замкнута через сопротивление нагрузки. Протекание токов некоммутирующих фаз по сопротивлению нагрузки вызывает образование переменной составляющей напряжения на выходе ВП, имеющей ча-

стоту $f = 6f_{AG}$. С этой же частотой происходит перезарядка конденсатора, включенного параллельно сопротивлению нагрузки. Как следует из изложенного, сопротивление нагрузки должно обладать двухсторонней проводимостью.

Принудительное переключение вентилялей вызывает протекание по обмотке статора трехфазного тока, первые гармоники которого создают в воздушном зазоре машины вращающееся магнитное поле. *Источником реактивной намагничивающей мощности АГВВ является вентильный преобразователь.* Кроме того, он выполняет функции выпрямителя и регулятора напряжения.

Замкнутость электрической цепи при включении тиристора и непрерывность протекания тока по обмотке статора обеспечиваются обратными диодами $VD_1 - VD_6$.

По данным исследований, АГВВ может устойчиво работать под нагрузкой без присоединения конденсаторов или внешних источников вынужденных колебаний. Однако в области малых нагрузок, близких к режиму холостого хода, на отдельных элементах схемы возникают перенапряжения, что приводит к необходимости включения на выходе ВП маломощного буферного конденсатора C_6 .

Асинхронный вентильный генератор постоянного тока с короткозамкнутым ротором (см. рис. 35) может быть использован в качестве стартер-генератора. В этом случае он работает параллельно с аккумуляторной батареей GB .

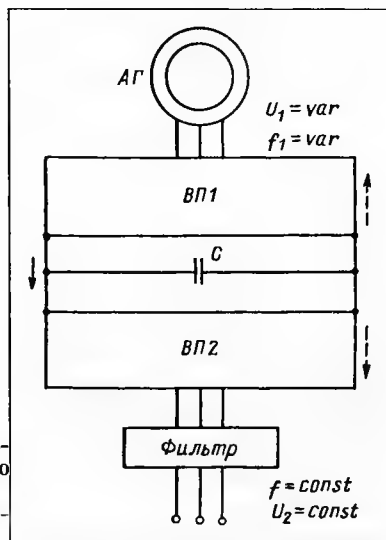


Рис. 36. Структурная схема асинхронного вентильного генератора переменного тока:
 ВП1, ВП2 — вентильные преобразователи; C — емкость конденсатора

Для запуска АГВВ предложен способ, в соответствии с которым частоту возбуждения устанавливают выше синхронной. Затем ее понижают до тех пор, пока напряжение генератора, возрастающее в процессе возбуждения, не достигнет заданного значения. Отключение генератора производится при скольжении, близком к нулю. Такой режим достигается соответствующим повышением частоты возбуждения.

На рис. 36 приведена структурная схема АГВВ с короткозамкнутым ротором, содержащая два вентильных преобразователя — *ВП1* и *ВП2*. Генератор предназначен для получения переменного напряжения стабильной частоты и может быть использован в режиме стартер-генератора.

Преобразователь *ВП1* аналогичен вентильному преобразователю предыдущей схемы. С помощью преобразователя *ВП2* осуществляется преобразование постоянного напряжения в переменное с заданными параметрами: $U_2 = \text{const}$, $f_2 = \text{const}$.

Асинхронный вентильный генератор (рис. 36) предназначен для установки на дизель-поездах, тепловозах, большегрузных автомобилях. Система генерирования содержит лишь 12 полностью управляемых полупроводниковых приборов. Небольшое число последних относится к достоинству схемы, а к ее недостаткам — двойное преобразование электрической энергии, обусловленное наличием звена постоянного тока.

11. Области применения асинхронных генераторов

Асинхронные генераторы находят широкое применение в качестве основных элементов автономных электроэнергетических установок. Ниже приводится далеко не полный перечень областей, в которых они используются или могут быть использованы.

1. В районах, удаленных от линий электропередачи и электростанций местного значения, асинхронные самовозбуждающиеся генераторы могут стать источниками питания асинхронных двигателей, электробытовых приборов, использоваться для освещения, обогрева и т.п. Конструктивно они представляют собой нормальную асинхронную машину трехфазного тока с короткозамкнутым ротором или машину специального исполнения.

На рис. 37 показан общий вид переносной малогабаритной электростанции “Дружба” с асинхронным самовозбуждающимся генератором, предназначенной для питания осветительных установок на лесосеках, лесосплаве и при изыскательских работах, а также для освещения помещений.

Масса электростанции (без горючего) 24 кг. Мощность на выходе генератора 1 кВт, напряжение 220 В, частота $200 \text{ Гц} \pm 5 \%$. В качестве генератора используется асинхронный короткозамкнутый двигатель мощностью 1,7 кВт, напряжением 220 В с частотой 200 Гц.

Применение асинхронных генераторов становится наиболее эффективным при наличии природных источников энергии. Для сельских электростанций разработан асинхронный капсульный генератор, объединенный с гидротурбиной в один блок. Мощность генератора 500 кВт, напряжение 400 В, коэффициент мощности 0,69; КПД 0,915. Вновь возрождаемые малые ГЭС с горизонтально расположенными генераторами будут выполняться на частоты вращения $500 - 1500 \text{ мин}^{-1}$ в диапазоне мощностей 500 — 4000 кВт.

2. Для питания электрифицированных сельскохозяйственных инструментов предложена малогабаритная передвижная электро-

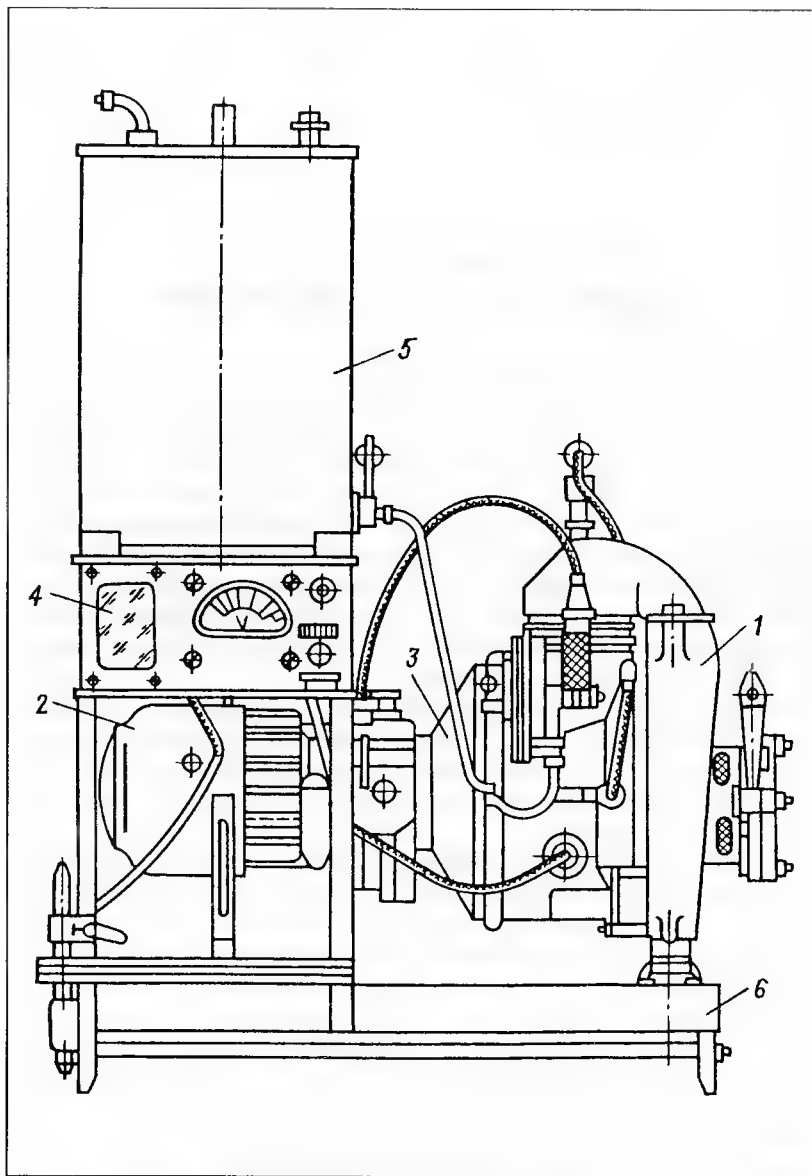


Рис. 37. Общий вид переносной электростанции "Дружба"

1 — первичный двигатель; 2 — асинхронный генератор; 3 — редуктор; 4 — распределительное устройство; 5 — топливный бак; 6 — каркасная рама

станция с асинхронным самовозбуждающимся генератором частотой 200 Гц. В качестве генератора используется асинхронный короткозамкнутый двигатель с синхронной частотой вращения 12 000 мин⁻¹.

3. Проведенные исследования доказали возможность использования асинхронного генератора с самовозбуждением для питания радиостанций небольшой мощности. При этом электроснабжение потребителей постоянного тока осуществляется посредством выпрямительных блоков со сглаживающими фильтрами.

4. Асинхронные генераторы повышенной частоты с возбуждением от конденсаторов находят применение в электротермии. Так, шведской фирмой ASEA для индукционного нагрева выпускаются генераторы мощностью до 200 кВт · А частотой 250 Гц.

5. Для питания ряда современных устройств необходимо иметь переменное напряжение строго постоянной, прецизионной частоты. При сочетании асинхронного короткозамкнутого генератора с задающим генератором может быть получен режим электромашинного усилителя переменного тока с высокой точностью стабилизации частоты [5].

6. В системах автоматического управления, следящем электроприводе небольшой мощности и счетно-решающих устройствах широко применяются асинхронные тахогенераторы с полым ротором, преобразующие механическое вращение в электрический сигнал.

К основным конструктивным элементам тахогенератора относятся наружный и внутренний магнитопроводы, выполненные из листового пермаллоя; короткозамкнутый ротор, изготовленный из немагнитного материала (обычно алюминия) в виде тонкостенного стакана; две обмотки, оси которых смещены на 90°. Асинхронные тахогенераторы обычно выполняются на частоты 50 — 500 Гц. Напряжение на выходе генератора зависит от частоты вращения.

Характерные особенности асинхронного тахогенератора:

частота напряжения на выходе независимо от частоты вращения остается постоянной, равной частоте напряжения возбуждения;

напряжение на выходе пропорционально частоте вращения ротора.

Асинхронный тахогенератор типа АТ-231 показан на рис. 38.

7. Асинхронный преобразователь частоты (АПЧ) представляет собой электрическую машину трехфазного тока с фазным ротором, соединенную с приводным двигателем и применяемую для питания асинхронных двигателей небольшой мощности током частоты скольжения. Обмотки статора и ротора АПЧ назовем соответственно входной и выходной. Входная обмотка является обмоткой возбужде-

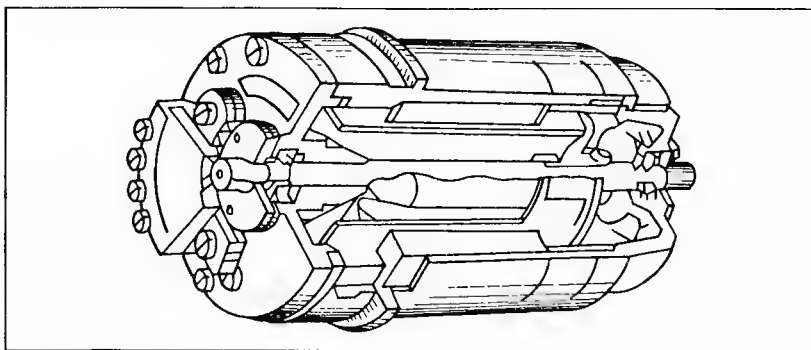


Рис. 38. Асинхронный тахогенератор типа АТ-231

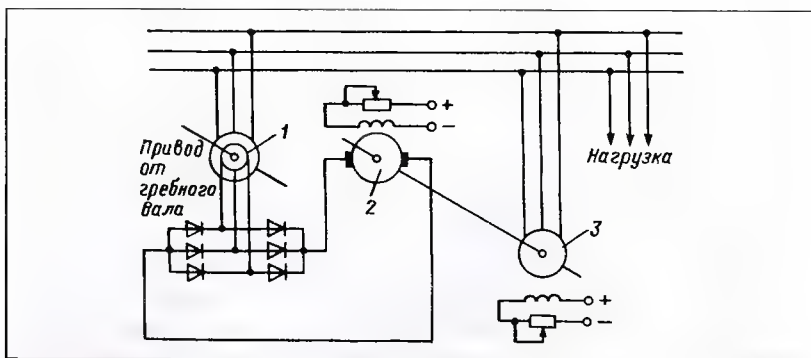


Рис. 39. Принципиальная схема каскадного соединения асинхронного генератора с двигателем постоянного тока:

1 — асинхронный генератор, 2 — двигатель постоянного тока; 3 — синхронный генератор; 4 — выпрямитель

ния: через нее поступает в машину реактивная намагничивающая мощность. Кроме того, она потребляет из сети или отдает в сеть активную мощность. Выходная обмотка присоединяется к нагрузке, она всегда находится в генераторном режиме.

8. В судовых электроэнергетических установках применяются асинхронные генераторы с приводом от гребных валов. К статорной обмотке генератора с фазным ротором подается напряжение возбуждения со стороны сети (от синхронного генератора).

Обмотка ротора через выпрямительный мост соединяется с цепью якоря двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, на

валу которого установлен синхронный генератор. Таким образом, энергия скольжения за вычетом потерь в каскаде асинхронный генератор — двигатель постоянного тока передается на вал синхронного генератора. Возможно также каскадное соединение двух асинхронных генераторов или соединение асинхронного генератора и двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением.

Принципиальная схема системы, в которой используется асинхронный генератор с приводом от гребных валов, приведена на рис. 39.

9. На промышленных предприятиях, где производятся испытания авиационных и других двигателей, целесообразно использовать асинхронные машины в генераторном режиме с отдачей энергии в сеть. Развиваемая при рекуперации мощность может изменяться в широких пределах, однако это не вызывает затруднений в ее реализации, так как, поступая в систему, она вызывает только соответствующее уменьшение нагрузки ее источников.

Рекуперация электрической энергии приносит существенный экономический эффект. Работы отечественных ученых в этой области, применивших оригинальный способ параллельного и каскадного соединений асинхронных генераторов, оказались на уровне передовых мировых технических достижений в этой области.

10. В мощных энергосистемах некоторых стран параллельно синхронным генераторам включаются асинхронные. По условию поддержания постоянства напряжения возбуждение синхронных генераторов при этом увеличивают, вследствие чего повышается их устойчивость. Целесообразность совместной параллельной работы источников становится еще более очевидной, если учесть, что значительная часть активной мощности системы вырабатывается асинхронными генераторами.

Исследования по применению асинхронных генераторов при передаче электрической энергии на большие расстояния были проведены и в нашей стране. Возможности применения асинхронных генераторов в крупных энергосистемах в связи с увеличением дальности передачи электрической энергии и мощности источников придается большое значение. Объясняется это следующими причинами:

1) передача реактивной мощности приводит к уменьшению пропускной способности линии; гораздо экономичнее устанавливать источники реактивной мощности (синхронные компенсаторы, косинусные конденсаторы) в местах ее потребления;

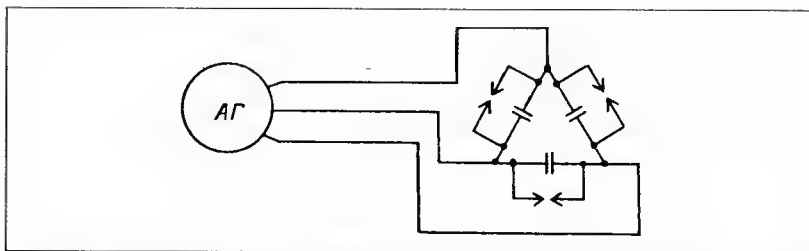


Рис. 40. Принципиальная схема импульсной системы электроснабжения с асинхронным самовозбуждающимся генератором

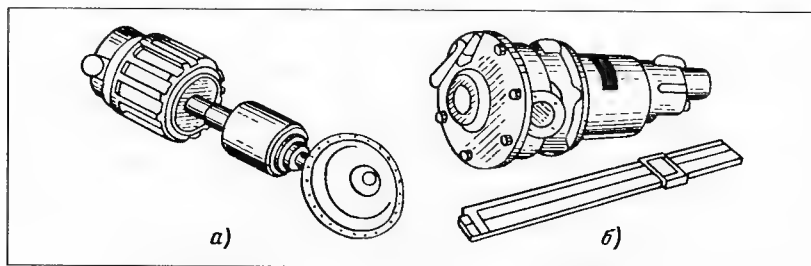


Рис. 41. Асинхронный генератор для управляемых снарядов:

а — устройство генератора с фланцевым креплением; *б* — внешний вид генератора с приводной турбиной

2) повышение коэффициента мощности синхронных генераторов связано с недоиспользованием их реактивной мощности и уменьшением устойчивости;

3) асинхронные генераторы мощностью 20 — 300 тыс. кВт значительно дешевле синхронных генераторов такой же мощности.

Из сказанного вытекает, что в мощных энергосистемах передавать на большие расстояния целесообразно только активную мощность, используя для этой цели и асинхронные генераторы, получающие реактивную намагничивающую мощность от синхронных генераторов.

11. В ряде новых областей техники находят применение импульсные системы электроснабжения, предназначенные для преобразования электрических импульсов в импульсы тепловой или световой энергии, энергии звука, магнитного поля и т.п.

Основными элементами таких систем являются источники электрической энергии переменного тока и конденсаторы. Принцип действия импульсной установки основывается на использовании энер-

гии, которая периодически накапливается в электрическом поле конденсатора. В момент, когда напряжение на конденсаторе достигает определенного (максимального) значения, замыкается цепь нагрузки; после разряда конденсатора она размыкается и т.д. Ток в импульсе зависит от мгновенного значения напряжения и сопротивления нагрузки.

По проведенным исследованиям положительный эффект дает использование асинхронного короткозамкнутого генератора с конденсаторным возбуждением в импульсных системах электроснабжения. Конденсаторы в этом случае выполняют роль не только источников реактивной намагничивающей мощности, но и накопителей электрической энергии. Периодическим разрядам подвергаются конденсаторы одной фазы или в определенной последовательности двух и трех фаз. При этом устойчивость работы генератора не нарушается.

Принципиальная схема импульсной системы электроснабжения с асинхронным самовозбуждающимся генератором приведена на рис. 40. Цепи управления разрядами конденсаторов и синхронизации на ней не показаны.

12. Простые по конструкции асинхронные короткозамкнутые машины допускают высокие частоты вращения, что с точки зрения возможности уменьшения массовых показателей приобретает особенно важное значение для авиации.

В некоторых зарубежных странах высокоскоростные асинхронные генераторы небольшой мощности, возбуждаемые от конденсаторов, находят применение на управляемых снарядах и других летательных аппаратах.

Асинхронный генератор для управляемых снарядов с фланцевым креплением (рис. 41, а) имеет частоту вращения $12\ 120\ \text{мин}^{-1}$ при напряжении 115/200 В и частоте 400 Гц. Внешний вид генератора с приводной турбиной показан на рис. 41, б.

13. В настоящее время в качестве основных источников переменного тока на летательных аппаратах используются синхронные генераторы, что обусловлено их достоинствами. В системах с активно-индуктивной нагрузкой они служат источниками не только активной, но и реактивной намагничивающей мощности. Стабилизация (регулирование) напряжения синхронных генераторов не встречает технических трудностей и осуществляется соответствующим изменением тока возбуждения. Кроме того, синхронные генераторы имеют высокий КПД: при частоте 400 Гц и частоте вращения $6000 - 8000\ \text{мин}^{-1}$ в диапазоне мощностей $15 - 100\ \text{кВ} \cdot \text{А}$ он составляет 0,85 - 0,95.

Синхронные генераторы могут быть выполнены бесконтактными. В этом случае повышается их эксплуатационная надежность. Однако эти машины имеют относительно большой воздушный зазор. Поэтому они тяжелее аналогичных асинхронных машин.

В течение последних лет как в нашей стране, так и за рубежом пристальное внимание уделяется вопросам, связанным с применением в системах электроснабжения летательных аппаратов асинхронных генераторов. Основными причинами этого являются:

- трудности осуществления параллельной работы синхронных генераторов при переменной частоте вращения авиадвигателей;

- совершенствование технологии производства существующих типов конденсаторов и разработка новых типов с улучшенными массовыми и эксплуатационными показателями;

- создание управляемых полупроводников с широким диапазоном мощностей.

Вместо синхронных генераторов, частота вращения которых по условию получения напряжения постоянной частоты должна оставаться строго постоянной, могут быть установлены асинхронные генераторы с короткозамкнутым или фазным ротором. Особенно перспективным представляется использование наиболее простой и надежной из электрических машин — асинхронной машины с короткозамкнутым ротором.

Целесообразность применения асинхронных генераторов на летательных аппаратах станет еще более очевидной, если учесть характерную для них простоту включения на параллельную работу и возможность совместной работы на общую сеть при рассогласовании частот вращения приводных авиадвигателей.

14. Определенный интерес вызывает также идея использования на самолетах с небольшим и значительным диапазоном изменения частоты вращения авиадвигателей асинхронных генераторов независимого возбуждения с фазным ротором. Генератор, возбуждаемый со стороны ротора, обеспечивает получение постоянной (стабилизированной) частоты. При этом отпадает необходимость в установке между авиадвигателем и генератором передаточных устройств с переменным передаточным отношением.

Такой генератор можно рассматривать как обращенный преобразователь частоты, у которого обмотка ротора является входной, а обмотка статора — выходной. На вход генератора подается напряжение, частота которого пропорциональна скольжению. Возбуждаемая таким образом асинхронная машина работает с синхронным потоком.

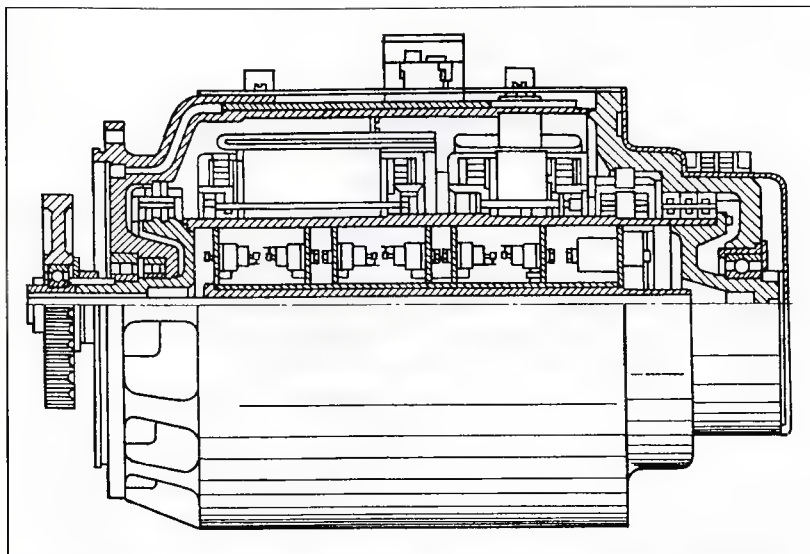


Рис. 42. Бесконтактный вариант асинхронного генератора с фазным ротором

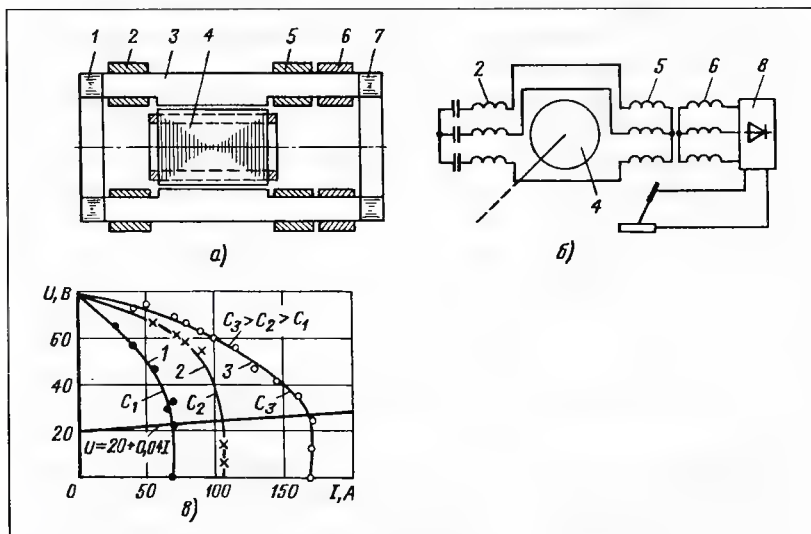


Рис. 43. Асинхронный сварочный генератор:

a — конструктивная схема; *б* — принципиальная электрическая схема; *в* — внешние характеристики

Бесконтактный вариант асинхронного генератор с синхронным потоком, разработанный в США, приведен на рис. 42.

15. Получение постоянного напряжения в автономных энергетических установках наиболее просто достигается, как было показано выше, с помощью АВГ — асинхронных самовозбуждающихся вентильных генераторов.

16. Асинхронные генераторы с вентильным возбуждением (АГВВ) позволяют получить как постоянное, так и переменное напряжение стабильной частоты при предельно малом числе управляемых полупроводниковых приборов. Однако для режима генерирования переменного напряжения желаемой частоты характерно двойное преобразование энергии с соответствующими потерями.

17. Перспективно применение асинхронных генераторов с короткозамкнутым ротором для электросварки [6].

Как показали исследования, срыв режима самовозбуждения при значительных токах нагрузки можно предотвратить путем соответствующих конструктивных и схемных решений. В наиболее совершенной конструкции источника питания сварочной дуги трехфазный асинхронный генератор (АСГ, рис. 43) имеет две обмотки возбуждения 2 и 5, генераторную обмотку 6 и короткозамкнутый ротор 4 обычной конструкции. Обмотки статора 2, 5 и 6 охватывают пакеты зубцов статора 3, которые расположены аксиально. По торцам зубцов закреплены два кольцевых ярма 1 и 7.

Принципиальная электрическая схема генератора приведена на рис. 43, б. Обмотки возбуждения, с включенными в их цепь конденсаторами, соединены последовательно. Сварочная цепь постоянного (выпрямленного) тока получает питание от генераторной обмотки через полупроводниковый выпрямитель 8.

Экспериментальные исследования опытного образца АСГ показали, что генератор обеспечивает надежное возбуждение и высокую стабильность горения сварочной дуги. Это объясняется двумя причинами:

магнитодвижущие силы обмоток возбуждения 2 и 5 одна относительно другой направлены встречно, а по отношению к ротору — согласно;

генераторная обмотка по отношению к обмотке возбуждения 5 является вторичной обмоткой трансформатора. Ток ее в режиме короткого замыкания оказывает сильное размагничивающее действие, и магнитный поток возбуждения существенно уменьшается. Однако поток, создаваемый теперь в основном магнитодвижущей силой обмотки возбуждения 2, оказывается достаточным для поддержания

определенного, зависящего от емкости конденсаторов, напряжения на выходе АСГ.

Внешние характеристики генератора для трех значений возбуждающей емкости приведены на рис. 43, в. Как видно, на рабочих участках (20 — 30 В) они являются крутопадающими, благодаря чему ограничиваются токи короткого замыкания.

С применением АСГ производилась сварка стальных труб. Сварной стык подвергался испытаниям на механическую прочность и проверке радиографическим методом. Установлено, что по качеству шва АСГ не уступает серийным сварочным генераторам.

Массогабаритные показатели АСГ с пленочными конденсаторами типа К78-17 выше, чем у коллекторного генератора постоянного тока, и практически находятся на уровне показателей индукторного генератора.

Таблица П1. Основные технические данные конденсаторов типа КБГ-МН

Рабочее напряжение постоянного тока, В	Номинальная емкость, мкФ	Габаритные размеры корпуса (длина × высота × ширина), мм
400	1	45 × 25 × 58
400	2	45 × 25 × 58
400	4	65 × 35 × 93
400	6	65 × 35 × 108
400	8	65 × 60 × 108
600	1	45 × 30 × 58
600	2	45 × 30 × 108
600	4	65 × 35 × 108
600	6	65 × 60 × 108
1000	1	45 × 30 × 78
1000	2	45 × 30 × 78
1000	4	65 × 60 × 108
1500	1	45 × 30 × 108
1500	2	65 × 60 × 108

При работе конденсаторов в цепи переменного тока допустимое напряжение не должно превышать значений, указанных в табл. П5.

Таблица П2. Допустимые напряжения конденсаторов в цепях постоянного и переменного тока

Номинальное напряжение постоянного тока, В	Допустимое напряжение, В, переменного тока при емкости конденсаторов, мкФ, для частоты			
	50 Гц		500 Гц	
	до 2	4 – 10	до 2	4 – 10
400	250	200	125	75
600	300	250	150	100
1000	400	350	200	150
1500	500	—	250	—

Таблица П3. Основные технические данные конденсаторов типа БГТ

Рабочее напряжение постоянного тока, В	Номинальная емкость, мкФ	Габаритные размеры корпуса (длина × высота × ширина), мм
400	1	45 × 30 × 54
400	2	45 × 60 × 54
400	4	65 × 35 × 112
400	6	65 × 50 × 112
400	8	65 × 70 × 112
600	1	45 × 45 × 54
600	2	65 × 30 × 112
600	4	65 × 50 × 112
600	6	65 × 70 × 112
1000	1	45 × 80 × 54
1000	2	65 × 45 × 112
1000	4	65 × 80 × 112

Таблица П4. Основные технические данные конденсаторов типа МБГЧ

Рабочее напряжение переменного тока, В	Номинальная емкость, мкФ	Габаритные размеры корпуса (длина × высота × ширина), мм	Рабочее напряжение переменного тока, В	Номинальная емкость, мкФ	Габаритные размеры корпуса (длина × высота × ширина), мм
250	1	46 × 11 × 50	500	2	46 × 41 × 50
250	2	46 × 16 × 50	500	4	69 × 34 × 115
250	4	46 × 26 × 50	750	1	46 × 51 × 50
250	10	46 × 56 × 50	750	2	69 × 84 × 115
500	1	46 × 21 × 50	—	—	—

Таблица П5. Основные технические данные пленочных конденсаторов К78-17

Емкость, мкФ	Рабочее напряжение при частоте 50 Гц			
	250 В		450 В	
	Размеры D × H, мм	Масса, г, не более	Размеры D × H, мм	Масса, г, не более
0,7	28 × 57	50	28 × 57	50
1	28 × 57	50	28 × 50	50
1,5	28 × 57	50	28 × 57	50
2	28 × 57	50	28 × 57	50
2,5	28 × 57	50	28 × 57	50
3	28 × 57	50	28 × 57	50
4	28 × 57	50	32 × 57	85
5	28 × 57	50	32 × 57	85
6	28 × 57	50	35 × 57	85
7	28 × 57	50	35 × 57	85
8	28 × 57	50	35 × 72	100
10	32 × 57	80	35 × 72	100
12	32 × 57	80	40 × 72	120
14	35 × 72	90	40 × 72	120
15	35 × 72	90	45 × 72	130
16	35 × 72	90	45 × 72	130
18	40 × 72	120	45 × 72	130
20	40 × 72	120	45 × 95	140
25	45 × 72	160	45 × 95	140
30	45 × 72	160	45 × 121	200
35	45 × 95	200	45 × 121	200
40	45 × 95	200	50 × 121	250
45	45 × 95	200	50 × 121	250
50	45 × 95	200	55 × 121	250

Список литературы

1. Алиев И. И., Беспалов В. Я., Клоков Ю. Б. Асинхронный генератор с гарантированным самовозбуждением // Электричество. 1997. № 7.
2. Боя-Сазонович С. П., Нетушил А. В., Китаев А. В. Самовозбуждение асинхронного генератора // Изв. вузов. Сер. Электромеханика. 1981. № 6.
3. Брускин Д. Э., Зорохович А. Е., Хвостов А. С. Электрические машины. Ч. 1. М.: Высшая школа, 1988.
4. Голован А. Т., Дубенский А. А. Асинхронный самовозбуждающийся генератор переменной частоты // Электричество. 1945. № 5.
5. Зеличенко Р. И. Электромашинный асинхронный усилитель мощности // Электротехника. 1966. № 12.
6. Джэндубаев А.-З. Р. Асинхронный сварочный генератор // Электричество. 1996. № 5.
7. Костырев М. Л., Скороспешкин А. И. Автономные асинхронные генераторы с вентильным возбуждением. М.: Энергоатомиздат, 1993.
8. Петров Г. Н. Электрические машины. Ч. 2. М.-Л.: ГЭИ, 1963.
9. Проектирование электрических машин / Под ред. И. П. Копылова. М.: Энергия, 1980.
10. Радин В. И., Брускин Д. Э., Зорохович А. Е. Электрические машины: Асинхронные машины. М.: Высшая школа, 1988.
11. Толстов Ю. Г. Применение асинхронных генераторов, возбуждаемых со стороны ротора, при передаче электрической энергии на большие расстояния // Электричество. 1940. № 12.
12. Торонцев Н. Д. Асинхронные генераторы автономных систем. М.: Знак, 1998.
13. Chirgwin K. M., Heights B., Stratton I. I. Patent № 3, 070 740. December, 25, 1962.

Содержание

Предисловие.	3
1. Элементы автономных электроэнергетических установок с асинхронными генераторами	4
2. Классификация асинхронных генераторов. Энергетические соотношения	5
3. Уравнения асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением	12
4. Частота генерируемых колебаний при холостом ходе и нагрузке.	18
5. Физические основы самовозбуждения	23
6. Характеристики автономных асинхронных генераторов с конденсаторным возбуждением	29
7. Стабилизация напряжения автономных асинхронных генераторов с конденсаторным возбуждением.	34
8. Энергетические показатели генераторных установок.	55
9. Асинхронный вентильный генератор постоянного тока с конденсаторным возбуждением	66
10. Асинхронные генераторы с вентильным возбуждением (АГВВ)	69
11. Области применения асинхронных генераторов	73
Приложение	84
Список литературы	86

Библиотечка электротехника

Приложение к производственно-массовому журналу "Энергетик"

ТОРОПЦЕВ НИКОЛАЙ ДЕМИДОВИЧ

Асинхронные генераторы для автономных электроэнергетических установок

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

115280, Москва, ул. Автозаводская, 14/23

Телефоны: (095) 275-19-06, тел. 275-00-23 доб. 22-47; факс: 234-74-21

Рецензент — доктор техн. наук, профессор Ю. Г. Шакарян (ВНИИЭ)

Редакторы: Л. Л. Жданова, Н. В. Олышанская

Худож.-техн. редактор Т. Ю. Андреева

Сдано в набор 28.05.2004 г. Подписано в печать 16.07.2004 г.

Формат 60×84¹/₁₆. Печать офсетная.

Печ. л. 5,5. Заказ БЭТ/7(67)-2004

Макет выполнен издательством "Фолиум": 127238, Москва, Дмитровское ш., 58.

Отпечатано типографией издательства "Фолиум": 127238, Москва, Дмитровское ш., 58.

Журнал “Энергетика за рубежом”

— приложение к журналу “Энергетик”

Подписывайтесь на специальное приложение к журналу “Энергетик” — **“Энергетика за рубежом”**. Это приложение выходит **один раз в два месяца**.

Журнал “Энергетика за рубежом” знакомит читателей с важнейшими проблемами современной зарубежной электроэнергетики, такими, как:

- развитие и надежность энергосистем и энергообъединений;
- особенности и новшества экономических и рыночных отношений в электроэнергетике;
- опыт внедрения прогрессивных технологий в энергетическое производство;
- модернизация и реконструкция (перемаркировка) оборудования электростанций, электрических и тепловых сетей;
- распространение нетрадиционных и возобновляемых источников энергии;
- энергосбережение, рациональное расходование топлива и экологические аспекты энергетики.

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении связи по объединенному каталогу **“ПРЕССА РОССИИ”**. Том 1. Российские и зарубежные газеты и журналы.

Индексы журнала “Энергетика за рубежом”

— приложения к журналу “Энергетик”

87261 — для предприятий и организаций;

87260 — для индивидуальных подписчиков.

Об авторе



Николай Демидович Торопцев —
профессор кафедры
электроснабжения
Карачаево-Черкесского
Государственного
технологического института,
доктор технических наук,
Заслуженный деятель науки РФ.

К основным публикациям автора относятся книги: “Авиационные электрические машины” (М.: МГА СССР, 1969), “Авиационные асинхронные генераторы” (М.: Транспорт, 1970), “Асинхронные генераторы повышенной частоты” (в соавторстве с Г. Н. Алюшиным, М.: Машиностроение, 1974), “Трехфазные асинхронные двигатели в однофазных сетях” (М.: Энергоатомиздат, 1997), “Асинхронные генераторы автономных систем” (М.: Знак, 1998).